

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY OHÝBÁNÍ DÍLCŮ Z TENKOSTĚNNÝCH PROFILŮ

SOLUTION OF BENDING TECHNOLOGY PROBLEMS OF THIN WALLED PROFILES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. KAREL MATOUŠEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Prof. Ing. RADKO SAMEK, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Matoušek Karel, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Řešení problematiky ohýbání dílců z tenkostěnných profilů

v anglickém jazyce:

Solution of bendig technology problems of thinn walled profiles

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh technologie ohybu tenkostěnných trubek kruhového a čtverhranného profilu. Návrh se má opírat o kriteria, zabezpečující ohyb dílců bez defektů
Experimentálně bude ověřována též tvařitelnost materiálu trubek a kritické procesní parametry ohybu.

Cíle diplomové práce:

Současný stav teoretických a technologických poznatků o ohybu trubek. Analýza procesních podmínek z hlediska tvorby defektů. Charakteristika vhodných zařízení-ohýbaček.

Experimentální ověření materiálových charakteristik trubek z hlediska tváření ohybem.resp.navazující technologie.

Návrh metodiky experimentálního ověření kritických parametrů ohybu.

Konstrukční návrh nástroje-kladky

Seznam odborné literatury:

- SAMEK, Radko, NETUŠILOVÁ, Renata. Návrh a ověření ohybu tenkostěnných trubek let. motorů. VAAZ. 1. vyd. Brno : [s.n.], 1983. 56 s., 14.
- ČSN EN 10002-1: 2002. Kovové materiály – zkoušení tahem – část1: zkušební metoda za okolní teploty, Praha: Český normalizační institut, 2002. 47 s.
- ALTAN, Taylan. The importance of the n value in sheet forming. STAMPING JournalŽ [online]. 2001 [cit. 2003-10-14].
- PETRUŽELKA, Jiří. Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2000. 156 s. ISBN 80-7078-635-3.
- HOSFORD, William F., CADDELL, Robert M. Metal forming: Mechanics and metallurgy. 2nd ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993. 329 s.

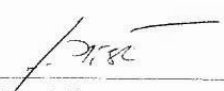
Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Radko Samek, CSc.

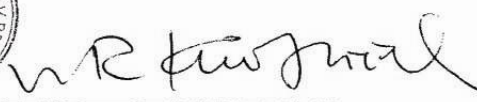
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 19.11.2009

L.S.




prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu


doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

LICENČNÍ SMLOUVA

ABSTRAKT

Prozkoumání problematiky a parametrů ohybu čtvercových dutých profilů. Zjištění deformace příčného průřezu. Zjištění použitelnosti nežíhaného materiálu pro konkrétní součást. Zjištění mechanických vlastností svarů a vliv jejich polohy při ohybu. Toto zjištění bylo provedeno na základě porovnání tahových zkoušek a následně aplikováno na konkrétní součást kde se prokázala vhodnost použití nežíhaného materiálu.

Klíčová slova

Čtvercový profil, Ohyb, Parametry ohybu, Deformace příčného průřezu, tahová zkouška, svar.

ABSTRACT

Reconnaissance of problems and parameters of square hollow profile bend. Finding (identification) of deformation of cross-section. Finding of suitability of unannealed material for component part. Finding of mechanical characteristics of welds and influence of their bend position. This finding was done on the basis of comparison of tensile tests and consequently applied to specific part where the suitability for use of unannealed material were proved.

Key words

square profile, bend, parameters of bend, deformation of cross-section, tensile test, weld.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MATOUŠEK, Karel. *Název: Řešení problematiky ohýbání dílců z tenkostěnných profilů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. s., příloh. Vedoucí práce Prof. Ing. Radko Samek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Řešení problematiky ohýbání dílců z tenkostěnných profilů* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. 5. 2010

.....
Bc. Karel Matoušek

Poděkování

Děkuji tímto panu Prof. Ing. Radku Samkovi, CSc za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji firmě Edscha Automotive s.r.o. za technickou podporu při vypracování diplomové práce. Konkrétně pak Ing. Petru Hájkovi.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod	8
1 Výroba polotovarů a technologie zpracování trubek.....	9
1.1 Výroba svařovaných trubek.....	9
1.2 Následné zpracování trubek	11
1.2.1 Radiální vypínání (výroba různých vydutých tvarů).....	11
1.2.2 Hydroforming.....	11
1.2.3 Různé druhy úpravy konců trubek:.....	11
1.2.4 Děrování trubek	12
1.2.5 Svařování trubek	12
1.2.6 Ohýbání trubek	12
2 Obecná problematika ohybu trubek.....	14
2.1 Rozložení napětí při ohybu.....	15
2.2 Deformace průřezu při ohybu	16
2.3 Parametry ohybu trubek kruhových	18
2.4 Možné defekty při ohybu trubek kruhového profilu.....	19
2.5 Ztenčení vnější stěny namáhané tahem	22
3 Problematika ohybu trubek čtvercového profilu.....	24
3.1 Parametry ohybu trubek čtvercového profilu.....	24
3.2 Borcení příčného průřezu	26
3.3 Poloha svaru při ohýbání	27
3.4 Ztenčení vnější stěny namáhané tahem	28
4 Konstrukční prvky nástrojové sekce	30
4.1 Přípravky a nářadí pro ohýbání	31
4.1.1 Matrice	32
4.1.2 Vyhlažovací lišta.....	32
4.1.3 Trny.....	33
4.2 Technická data a specifikace ohýbačky UNISON MG 2790.....	35
5 Silový rozbor ohýbání	36
5.1 Ohybový moment.....	38
5.1.1 Ohybový moment v případě zpevnění materiálu	39
5.1.2 Výpočet ohybového momentu pro případ nezpevňujícího materiálu...39	
6 Výsledky experimentů a měření	43
6.1 Tahová zkouška	43
6.2 Deformace průřezu	46
7 Technicko ekonomické zhodnocení	48
7.1 Zhodnocení nákladů	49
7.2 Cenová kalkulace úspor při použití nežíhaného materiálu.....	50
Závěr	51
Seznam použitých zdrojů	52
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	53
Seznam příloh	55

ÚVOD

V současném globálním ekonomickém prostředí neustále stoupá tlak na zvyšování efektivity, zkracování vývojových cyklů nových výrobků a na neustálou inovaci stávajících výrobků. Firmy jsou nuceny přicházet s novými a pokrokovými výrobky, které jim umožní udržet nebo získat náskok před konkurencí. Stále ve větší míře se objevují nejen nové technologie a přístupy k řešení tradičních problémů. Mezi tuto problematiku bezesporu patří ohýbání a to zejména ohýbání tenkostěnných trubek. Trendem v dnešní době je snižování hmotnosti při zachování všech mechanických vlastností. A právě proto roste význam lehčených konstrukcí. Tyto konstrukce se používají v automobilovém průmyslu, u hydraulických strojů, parních turbín a zejména v leteckém průmyslu, kde mají zásadní význam. Předmětem diplomové práce je zaměření na technologii výroby dílců čtvercového profilu, které jsou svařované vysokofrekvenčním svařováním. Budou zkoumány parametry ohybu těchto dílců, které jsou konkrétně využity v automobilovém průmyslu.

1 VÝROBA POLOTOVARŮ A TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ TRUBEK

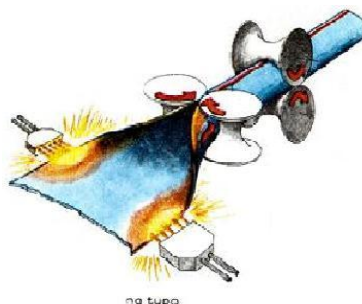
Trubky se vyrábějí z hutnických polotovarů mnoha způsoby a to válcováním, tažením, vytlačováním a svařováním. Podle toho jsou trubky bezešvé (hladké) a švové (svařované). Bezešvé ocelové trubky se vyrábí především z předvalků dalším válcováním a tažením. Trubky svařované se vyrábějí z rovinného plechu.[10]

1.1 Výroba svařovaných trubek

Tato práce se zabývá tvarovým ohybem svařovaných trubek čtvercového profilu. Způsob výroby hranatých a kulatých trubek s využitím svařování je stejný. Polotovar pro svařování se získá postupným uzavíráním tvaru pásu plechu ve válcovací stolici na jejímž konci je trubka svařena. Výhodou je možnost výroby dlouhých polotovarů z pásů plechu. Metoda svařování ovlivňuje kvalitu svaru a tím i mechanické vlastnosti výrobku. Z tohoto se odvíjí možnosti použití trubek (stavebnictví a strojním průmyslu, jehož nedílnou součástí je výroba automobilů). Níže budou přiblíženy metody svařování pro trubky využívané na konstrukci automobilů.

- Svařování na tupo v peci

K tomuto způsobu výroby trubek se používá spojitě svařování v plynové peci. Je to velmi výkonný způsob využívající levnější pásovou ocel. Tímto způsobem se vyrábějí trubky o průměru od 10 do 114 mm s tloušťkou stěny 2 mm a větší určené především pro konstrukční účely. [10]

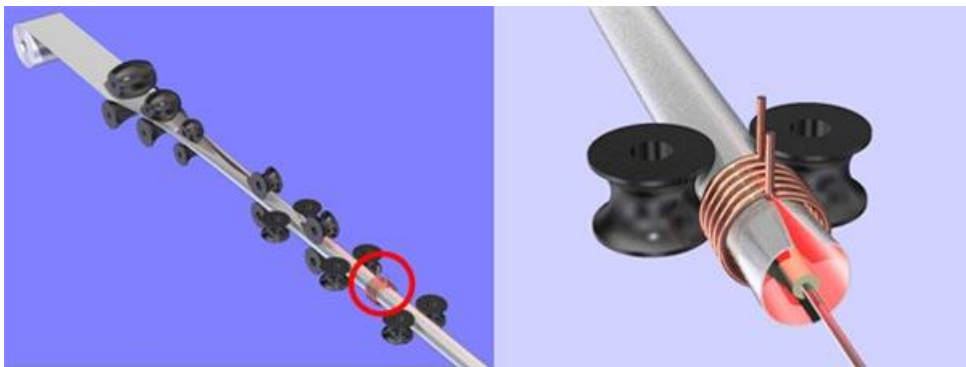


Obr. 1.1.1 Výroba trubek svařováním na tupo [13]

- Odporové svařování

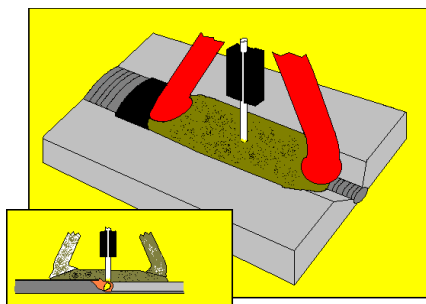
Výrobní způsob umožňuje spojitě svařování v nekonečných délkách. Tento způsob výroby je zvláště vhodný pro trubky malých průměrů 8 až 10 mm z uhlíkových i legovaných ocelí. Rozlišují se dva druhy odporového svařování a to:

- Odporové svařování proudem o nízké frekvenci
Svařuje se síťovým proudem 50 nebo 60 Hz nebo 150 až 200Hz při napětí 2 až 10 V o 10000 až 100 000 A rychlost svařování je 25 až 35 m.min⁻¹ [10]
- Odporové svařování proudem o vysoké frekvenci
Při tomto způsobu svařování proud probíhá jen po povrchu vodiče, takže na vysokou teplotu se zahřívá jen tenká vrstva materiálu svarových ploch. Proud se přenáší do trubky dotykem a má frekvenci 450 000Hz. Rychlosti svařování se pohybují kolem 100 m.min⁻¹.
- **Indukční svařování trubek**
 - Nízkofrekvenční - proudem do 500 Hz musí být do trubky vloženo železné jádro, což omezuje délku svařovaných trubek.
 - Středofrekvenční - proudem o frekvenci 4000-10000 Hz. Cívka je umístěna nad místem svaru a nedotýká se trubky. Kovové jádro není třeba, proto lze vyrábět trubky nekonečných délek. Rychlost svařování se pohybuje od 30 do 80 m.min⁻¹.
 - Vysokofrekvenční - proudem o frekvenci 450000 Hz. Tento způsob se nejvíce hodí pro výrobu tenkostěnných trubek z legovaných ocelí. Rozsah svařovacích rychlostí je 28 až 70 m.min⁻¹. [10]



Obr. 1.1.2 Vysokofrekvenční svařování

- Odporové svařování trubek stejnosměrným proudem
Tento způsob je vhodný pro hromadnou výrobu trubek z nelegovaných ocelí kde se uplatní vysoká svařovací rychlost až 100m.min⁻¹. [10]
- Tavné svařování trubek
Tavné svařování se používá nejčastěji k výrobě trubek od průměru 140 mm do 1400 mm, s tloušťkou stěny 4 – 25 mm. Způsob je však použitelný i pro tenkostěnné trubky s tloušťkou stěny od 1 mm.



Obr. 1.1.3 Tavné svařování

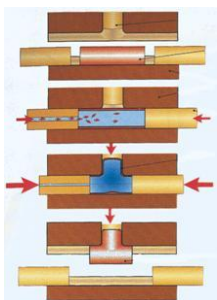
1.2 *Následné zpracování trubek*

Po výrobě se trubky zpracovávají na požadovaný tvar různými způsoby. Mezi vybrané patří:

1.2.1 Radiální vypínání (výroba různých vydutých tvarů)

1.2.2 Hydroforming

Kapalina působí hydrostatickým tlakem na polotovar, který se deformuje podle tvaru nástroje



Obr. 1.2.1 Princip tváření trubek pomocí kapaliny [10]



Obr. 1.2.2 Ukázka dílců vyráběných pomocí vnitřního tlaku kapaliny [14]

1.2.3 Různé druhy úpravy konců trubek:



Obr.1.2.3. Úprava konců trubek [14]

1.2.4 Děrování trubek

Při tvorbě otvorů do trubek je nutné zachovat geometrický tvar trubky a zabránit deformacím. Mezi vybrané způsoby děrování patří:

- Děrování prostřížením
- Vrtání
- Řezání otvorů laserem
- Prostřížení otvorů nepevnými nástroji

1.2.5 Svařování trubek

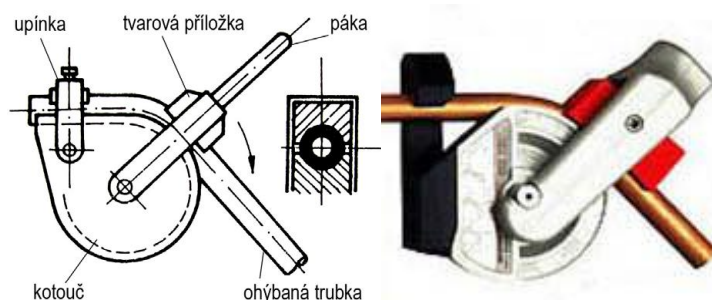
Samotné trubky se vzájemně svařují a vytvářejí tak různé konstrukce. Na trubky se též navařují různé tvary úchytek k instalaci do konstrukčních systémů.

1.2.6 Ohýbání trubek

Principy ohýbání trubek

a) Ruční ohyb v přípravku

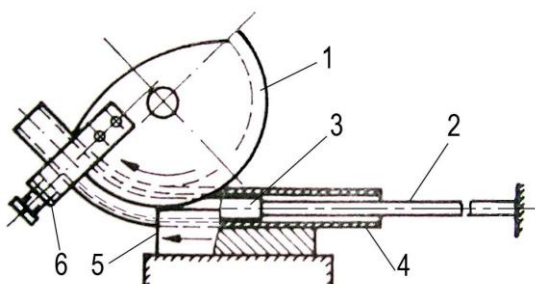
Metoda se využívá pro ohýbání tenkostěnných trubek do průměru cca $D < 20$ mm a minimálního poloměru $R_{\min} \geq 2,5 D$. Trubka se ohýbá přes kotouč pomocí páky na které je upevněna tvarová příložka (nebo kladka). Poloměr ohybu je dán poloměrem kotouče. Proti zdeformování se trubky mohou stabilizovat "hydraulickou" kapalinou. [3]



Obr. 1.2.4 Schéma ruční ohýbačky (vlevo). Ruční ohýbačka Signolo (vpravo)

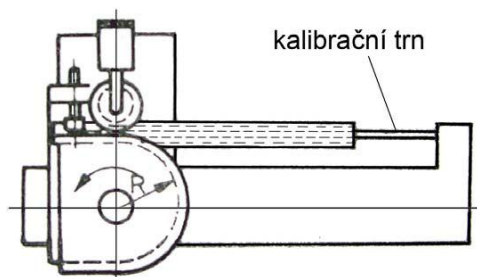
b) Navíjení nástroje

Metoda založena na principu pohyblivé matrice, která koná rotační pohyb a navíjí tak k ní uchycenou trubku. Při ohybu trubek navíjením se kvalita ohybu zlepší užitím pevných vložek – trnů, mechanických ohebných vložek. [3]



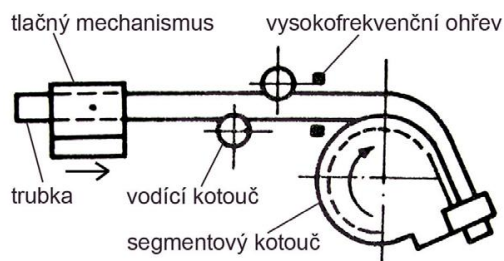
Obr. 1.2.5 Schéma nástroje pro ohyb navíjením [3] 1 – segmentový kotouč (matrice, či ohýbací segment), 2 – nosná tyč, 3 – trn, 4 – trubka, 5 – lišta, 6 – upínka

Ohyb navíjením se realizuje většinou na strojních ohýbačkách. Pracovní schéma mechanické ohýbačky je uvedeno na obr. 2.2.6. Kalibrační trn na tyči sahá až do místa ohybu, kde působí též dotlačovací profilová kladka. [3], [10]



Obr. 1.2.6 Pracovní schéma mechanické ohýbačky [3]

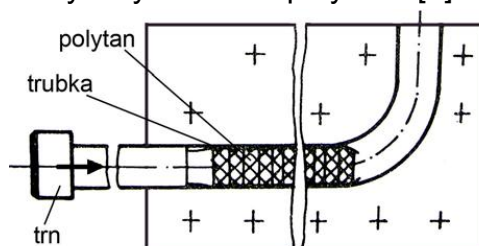
c) **Ohyb kombinovaný s osovou tlakovou silou** Při ohýbání trubek na velmi ostrý poloměr, kdy $R/D = 1,7$ až $1,5$, dochází ke značnému ztenčení tloušťky stěny na vnějším poloměru, které činí cca 25%, což je nepřijatelná hodnota pro řadu dílců, jež vyžadují dostatečnou pevnost (např. letecká a dopravní technika). Proces ztenčení mohou omezit nebo kompenzovat jen technologie ohybu za současného tlaku, což lze uskutečnit bez ohřevu nebo s ohřevem polotovaru. Nejlepší parametry poskytuje ohyb kombinovaný s tlakem za vysokofrekvenčního ohřevu úzce vymezené oblasti dílce. Princip navíjení s ohřevem je uveden na obr. 223.1. [3]



Obr. 1.2.7 Schéma navíjení trubky s osovým tlakem a ohřevem [3]

d) Ohýbání protlačováním

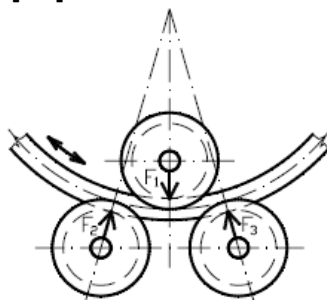
Ohýbání krátkých trubek tenkostěnných, a to na velmi ostrý poloměr, se úspěšně provádí protlačováním za studena v dělené zápustce a to s využitím polytanové výplně. Trn působí pouze na polytan, který rozpěchujeme. V důsledku třecích sil je trubka polytanem nesena ve směru pohybu trnu a její průřez je zatěžován tlakovým napětím. Dochází k napěchování stěny, čímž je v ohnisku deformace kompenzováno její ztenčování. Vznik zvlnění na vnitřním poloměru je potlačen vysokým tlakem polytanu.[3]



Obr. 1.2.8 Schéma procesu protlačení trubky s polytanovou výplní [3]

e) Ohyb zakružováním

Zakružování se provádí ve vertikální poloze mezi třemi kladkami, které jsou umístěny na horizontálních hřídelích. Kladky jsou poháněny většinou reverzním elektromotorem s možností plynulé regulace nebo je kladka poháněná ručně. U strojních zakružovaček je počet poháněných kladek různý, od jedné poháněné kladky až po všechny tři. Přítlak trubky je většinou prováděn horní kladkou. [10]

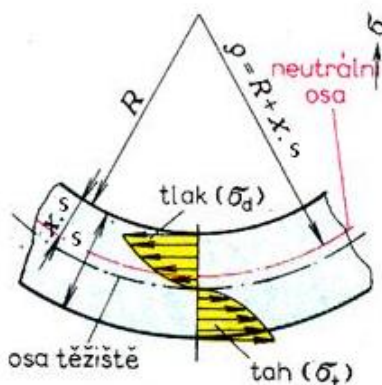


Obr. 1.2.9 Schéma zakružování

2 OBECNÁ PROBLEMATIKA OHYBU TRUBEK

Tato kapitola věnuje pozornost obecné problematice ohybu, která souvisí se zaměřením této práce. Problematika ohybu kruhových trubek je celkem prozkoumána a jsou známa kritéria, která upozorňují na možnost vzniku defektů. O problematice defektů ohýbaných čtvercových trubek jsou k dispozici jen obecné informace, nicméně proces ohýbání z hlediska rozložení napětí a deformace se u kruhových a čtvercovitých trubek významně neodlišuje. Proto budou nejprve uvedena kritéria pro vznik defektů u trubek kruhových s následnou aplikací na trubky čtvercové.

2.1 Rozložení napětí při ohybu



Obr.2.1.1 Rozložení a velikost napětí v materiálu [13]

Obrácený průběh napětí při ohybu uvádí obr. 2.1.1. Jde o jednoosou napjatost, která je charakteristická pro úzké pásy viz. obr 2.1.2. Obecný charakter napětí je možno pro zjednodušení výpočtových vztahů aproximovat lineárními funkcemi $\sigma=f(\varepsilon)$. Průběh aproximované závislosti $\sigma=f(\varepsilon)$ odpovídající tahové zkoušce.

- Oblast bodu (b) představuje ideálně pružně plastické deformace.
- Oblast bodu (d) představuje pružně plasticky zpevňující materiál.

Průběhu lze využít ke znázornění průběhu (rozložení) ohybových napětí v tahové i tlakové straně ohýbaného pásu.

Uvažuje-li se zpevňování materiálu při tváření za studena, odpovídá napětí podle schématu 2.1.2 d. Jde o tzv. ostrý ohyb kde $R/s \leq 3,5$. Schéma b odpovídá velkému poloměru ohybu $R/s = 20, 30 \dots$ U tohoto tzv. "volného" ohybu je v okolí neutrální osy pásmo pružných deformací, které je příčinou odpružování (změnou R a α) po odlehčení.

Průběhu napětí dle obr. 2.1.2 b,c,d, odpovídají momenty vnitřních sil. [9], [13]

b)

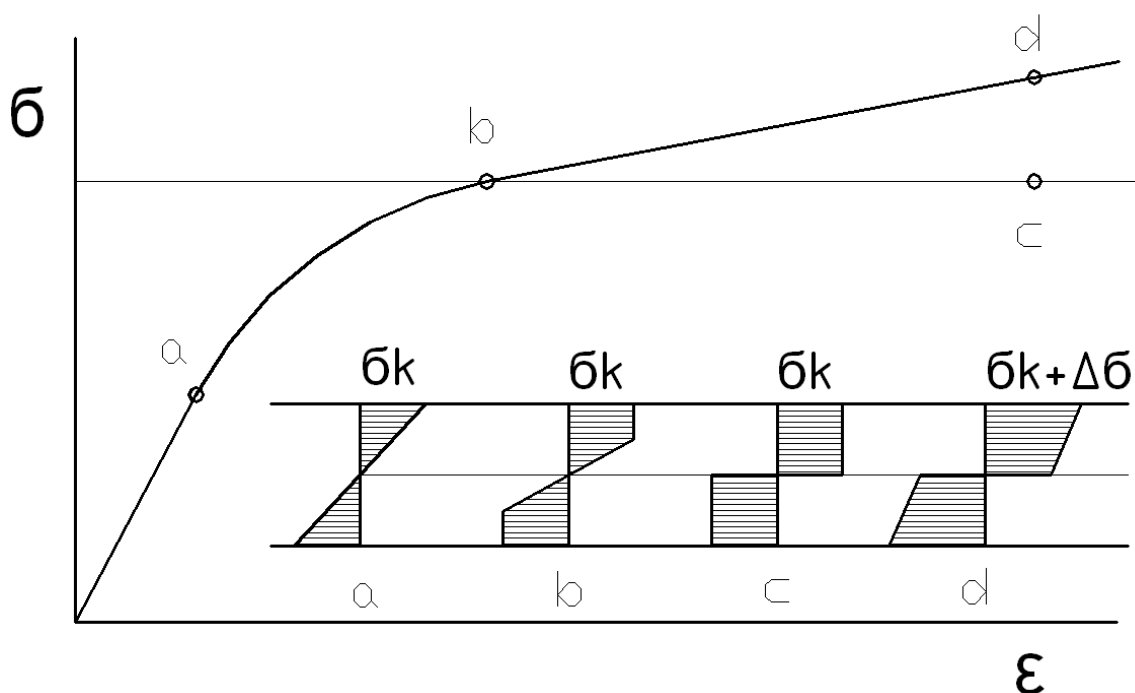
$$M_{ov} = \sigma_k \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} - \frac{1}{3} \cdot \frac{b \cdot \sigma_k^3 \cdot R_s^2}{E^2} \quad (1)$$

c)

$$M_{ov} = \sigma_k \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} \quad (2)$$

d)

$$M_{ov} = \sigma_k \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} + \frac{\bar{D}}{R_s} \cdot \frac{b \cdot s^3}{12} \quad (3)$$



Obr.2.1.2: Rozložení napětí v příčném průřezu při ohybu materiálu [13]

Výše uvedené vztahy platí pro plechy o tloušťce (s) a šířce pásu plechu (b).
Např. vztah č. 3 v obecném vyjádření je:

$$M_{ov} = \sigma_k \cdot S_M + \frac{\bar{D}}{R_s \cdot J} \quad (4)$$

Pro trubky ať kruhového nebo čtvercového profilu se pro stanovení vnitřních momentových sil dle napěťových charakteristik b, c, d, dosadí odpovídající výpočtový tvar za veličiny S_M a J dle odpovídajícího tvaru ohýbaného profilu. Např. pro trubky kruhového profilu dle [3] platí tento vztah:

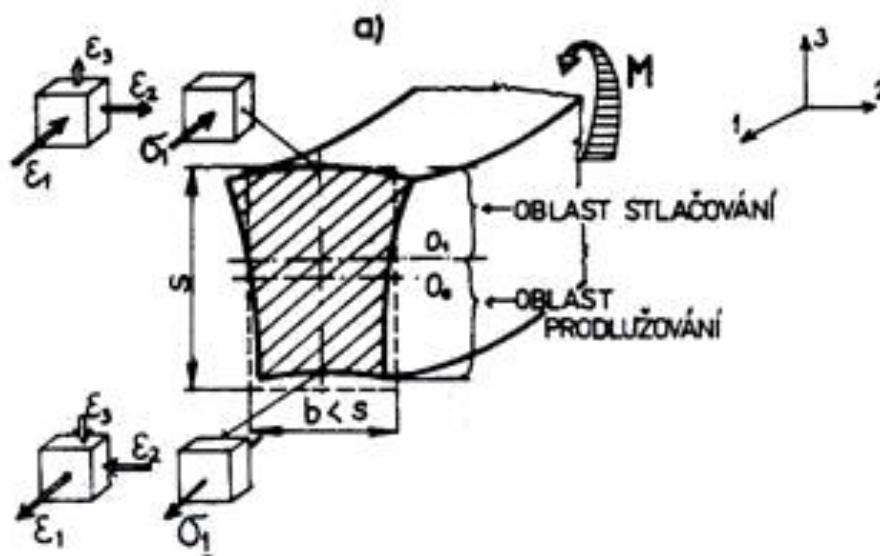
$$M_{ov} = \sigma_k \cdot d^2 \cdot S_0 + \frac{\bar{D} \cdot d^3 \cdot S_0 \cdot \pi}{8 \cdot R_s} \quad (5)$$

2.2 Deformace průřezu při ohybu

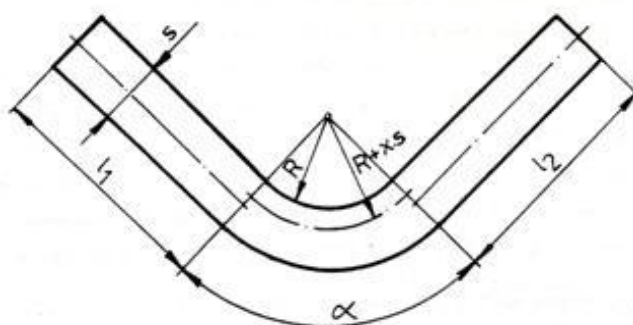
a) Pásy tyče

Při ohybu může dojít k deformaci průřezu, zejména u úzkých pásů, tyčí atd. Deformace průřezu tyče čtvercového profilu pro $b \leq 3s$ je znázorněna na obr. 2.2.1. Vyšší průřezy jsou více deformovány než průřezy nižší. U širokých pásů ($b \geq 3s$) nedochází k deformaci proto, protože proti deformacím v příčném směru působí odpor materiálu velké šířky vzhledem k jeho malé tloušťce.

V neutrální ose, kde jsou σ a ε nulová, jsou vlákna bez napětí a bez deformace. Neutrální osa je na začátku ohýbání uprostřed průřezu, postupně se však se zmenšujícím poloměrem ohybu posouvá směrem k vnitřní straně ohybu. Obr. 2.2.2



Obr.2.2.1 Deformace průřezu během ohýbání pro rozdílné výšky a profily [13]



Obr. 2.2.2 Posunutí neutrální osy v místě ohybu [13]

b) trubky

Trubky se od pásu a tyčí odlišují tím, že nemají „plný průřez“, jde o duté víceméně tenkostěnné polotovary. V porovnání geometrie průřezu tyče dle obr. 2.2.1 je u kruhové trubky $b=s=\varnothing D$ u čtvercové tyče $b=s=h$. Na rozdíl od plného průřezu je deformace příčného řezu trubek ovlivněna tloušťkou stěny (s), kromě toho se u kruhového a čtvercového profilu trubky z hlediska „borcení“ příčného tvaru odlišují. Tato problematika je uvedena v kapitole 3. Nicméně napětově-deformační stav uvedený na obr. 2.2.1 je možno částečně aplikovat na analýzu problému „borcení“ příčného průřezu čtvercových trubek.

2.3 Parametry ohybu trubek kruhových

Hlavní technologické parametry při ohybu tenkostěnných trubek je: [1]

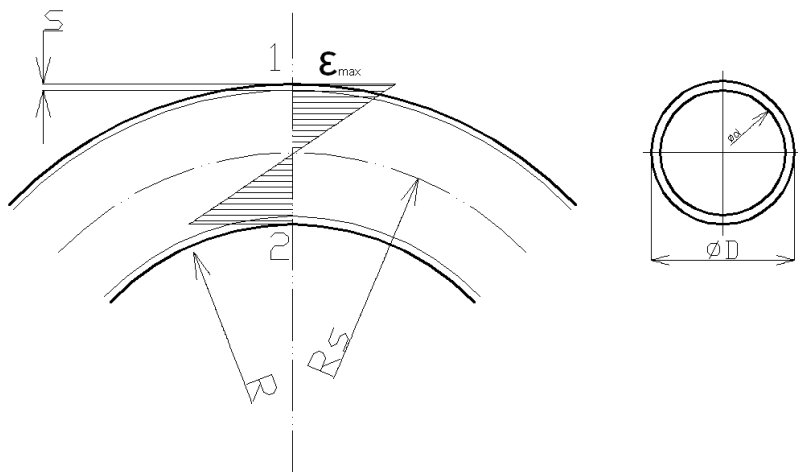
- Úhel ohybu

$$\text{relativní tloušťka stěny} \quad \frac{S_0}{D} \quad (6)$$

$$\text{relativní poloměr ohybu} \quad \frac{R}{D} \quad (7)$$

Tato technologická kritéria hodnotí stupeň obtížnosti procesu ohýbání. Hodnota relativní tloušťky stěny určuje hranici mezi tenkostěnnými a tlustostěnnými trubkami. Za tenkostěnnou trubku považujeme tu, jejíž poměr $s_0/D = \left(\frac{1}{10}\right) \frac{1}{15} \div \frac{1}{20}$ v závislosti na tom, který defekt je sledován jako kritický pro součástku. Určení jaký defekt je kritický závisí na funkci součástky.

Na obr. 2.3.1 je uvedena geometrie kruhové trubky. Průběh přetvoření v osovém směru. Body 1 a 2 jsou kritická místa, kde může dojít k defektům.[1]



Obr. 2.3.1 Průběh přetvoření kruhové trubky [3]

Stupeň obtížnosti procesu ohybu je možno hodnotit pomocí empirických technologických limitů, např. optimální proces vyžaduje, aby:

$$\frac{S_0}{D} \geq 0,1; \quad \frac{R}{D} \geq 3$$

Přijatelnému procesu vyhovují hodnoty:

$$\frac{S_0}{D} = 0,075; \quad \frac{R}{D} = 2,5$$

Nevhodné podmínky nastávají, když:

$$\frac{S_0}{D} \geq 0,05; \quad \frac{R}{D} \leq 2,5$$

V těchto případech se doporučuje použít výplně ke stabilizaci průměru. Tak se oddálí ztráta stability vnitřní stěny. viz obr. 2.4.1

Technologický parametr S_0/D resp. R/D souvisí s teoretickým poměrným poloměrem ohybu R_s/r který je [1]

$$\frac{R_s}{r} = \frac{\frac{2R_s}{D} - 1}{1 - \frac{S_0}{D}} \quad (8)$$

Z uvedeného vyplývá závislost na technologických parametrech $\frac{S_0}{D}$ a $\frac{R}{D}$.

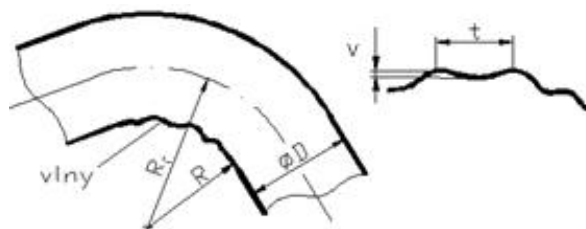
2.4 Možné defekty při ohybu trubek kruhového profilu

Nejsou-li dodrženy mezní podmínky $\frac{S_0}{D}$ a $\frac{R}{D}$ dochází ke vzniku defektu:

- zvlnění na vnitřním poloměru ohybu
- odpružení
- zploštění kruhového průřezu

Zvlnění Stěny trubky

Zvlnění stěny trubky v oblasti vnitřního poloměru se projeví ztrátou stability vnitřní stěny, která je zatížena napětím tlakového charakteru viz obr. 2.4.1 K potlačení vln je vhodné využít vnitřní výplně.[3]



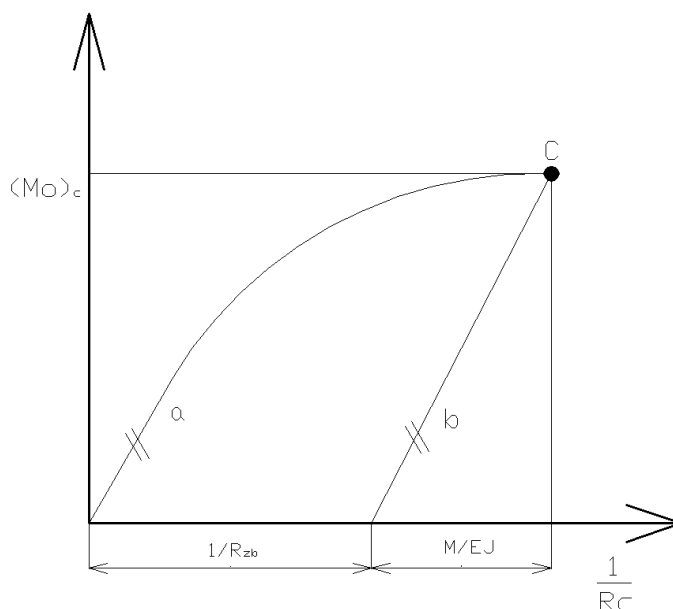
Obr. 2.4.1 Znázornění zvlnění trubky

Odpružení [6], [9], [1]

Při výpočtu odpružení vycházíme ze zákona o odpružení plasticky deformovaných těles. Tedy odpružení v plastickém rozsahu deformací probíhá se stejnými zákonitostmi jako v oboru elastickém. Na obr 2.4.2 je znázorněno rovnoběžností přímky a) (elastický obor) a přímky b) (plastický obor). Přímka b) v grafu na obr. 2.4.2 znázorňuje mechanismus odpružení, který umožňuje vyjádřit zbytkovou křivost $\frac{1}{R_{zb}}$ po odpružení. Kde $\frac{1}{R_c}$ je křivost při zatížení osovým momentem s hodnotou $(M_o)_c$ pak:

$$\frac{1}{R_{zb}} = \frac{M_{oc}}{EJ}$$

(9)



Obr. 2.4.2 závislost ohybového momentu na středním radiusu [6]

Přičemž:

$$\frac{1}{R_{zb}} = \frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_{od}}$$

(10)

Po dosazení rovnice (9) do (10) a následné úpravě se získá rovnice pro výpočet zbytkového poloměru:

$$R_{zb} = \frac{R_c}{1 - \frac{M_{oc} \cdot R_s}{E \cdot J}}$$

(11)

Se změnou poloměru souvisí také změna úhlu ohybu trubky $\Delta\alpha$:

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha_{zb}$$

(12)

Stanoví se z podmínky, že délka neutrálního vlákna zůstane po odpružení nezměněna.

$$R_s \cdot \alpha = R_{zb} \cdot \alpha_{zb}$$

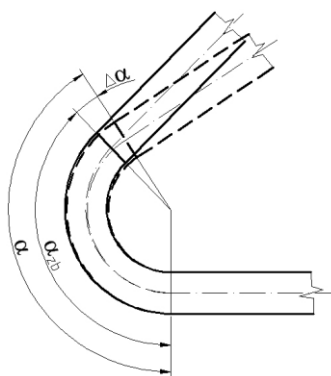
(13)

Po dosazení rovnice (17) do (19) si vyjádříme α_{zb} :

$$\alpha_{zb} = \alpha - \alpha \cdot \frac{M \cdot R_c}{E \cdot J} \quad (14)$$

Po dosazení (19) do (18) dostaneme konečný vzorec pro výpočet změny úhlu po ohybu:

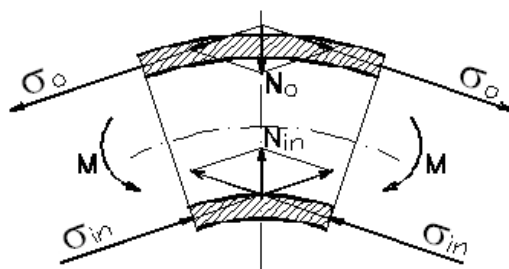
$$\Delta\alpha = \alpha \cdot \frac{M \cdot R_c}{E \cdot J} \quad (15)$$



Obr. 2.4.3 Změna úhlu v důsledku odpružení [7]

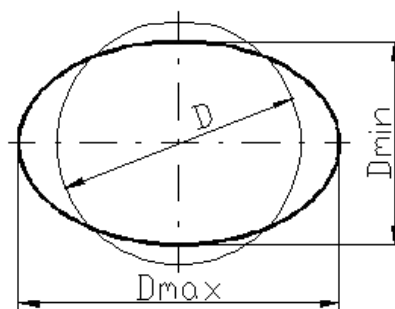
Zploštění kruhového průřezu trubky

Vznik ovality průřezu lze vysvětlit na základě rozkladu sil v prostoru ohybu. V důsledku působení vnějšího ohybového momentu M_o vznikají ve vnitřní a vnější polovině průřezu tlaková a tahová osová napětí, působící podél křivky ohybu. [7], [3]



Obr. 3.4.4 Schéma napětí a sil, které se vytváří při ohybu. ("o" - vnější stěna, "in" – vnitřní stěna trubky)

Zploštění trubky je sledováno pomocí koeficientu ovality K_o , který hodnotí změnu kruhu na eliptický tvar:



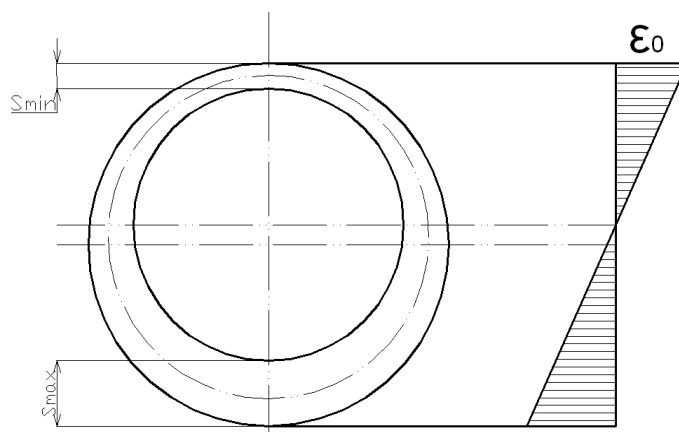
Obr. 2.4.5 Rozměry zploštěné trubky [6]

$$K_o = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \cdot 100 \quad [\%] \quad (16)$$

Jde o smluvní vyjádření ovality dle technických předpisů. Přípustné hodnoty se kontrolují průchodem kuličky, jejíž průměr je předepsán příslušnými normami. Zplošťování trubek je možno do určité míry potlačit užitím výplní.[3]

2.5 Ztenčení vnější stěny namáhané tahem

Ztenčení stěny trubky nastává v oblasti vnějšího poloměru ohybu (na vnější stěně trubky), neboť je zde tahové zatížení. Na vnitřním poloměru R působí tlak a dochází zde k nárůstu tloušťky stěny trubky. Ztenčení roste se zmenšením poloměru ohybu, případně se zvětšením průměru trubky.[3]



Obr. 2.5.1 Změna tloušťky stěny při ohybu [1]

Přesněji lze odvodit S_{\min} z deformací takto:

- vycházíme z předpokladu rovinné deformace, kdy osové přetvoření:

$$\varepsilon_o = \frac{y}{R_s} \quad (17)$$

- tangenciální přetvoření:

$$\varepsilon_t = 0, \quad (18)$$

- pro radiální přetvoření ve směru tloušťky stěny vyplývá ze zákona o konstantním objemu:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_o, \quad (19)$$

- maximální hodnota osového přetvoření je dána vztahem:

$$\varepsilon_{0\max} = \frac{r}{R_s} = \frac{d_{\text{vnitřní}}}{2 \cdot R_s} = \frac{D - 2S_0}{2 \cdot R_s} \quad (20)$$

- radiální přetvoření ve směru tloušťky stěny:

$$\varepsilon_{r\max} = \frac{s_0 - s_{\min}}{s_0} = 1 - \frac{s_{\min}}{s_0}. \quad (21)$$

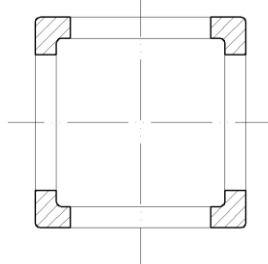
Po dosazení rovnic (20) a (21) do (19) dostaneme výsledný vztah:

$$S_{\min} = S_0 \cdot \left(1 - \frac{d - S_0}{2 \cdot R_s} \right) \quad (22)$$

Ztenčování stěny je velmi obtížné potlačit na přijatelnou míru, zvláště při užití běžných způsobů ohybu, a to i při použití výplní.[3]

3 PROBLEMATIKA OHYBU TRUBEK ČTVERCOVÉHO PROFILU

Konkrétní aplikace výpočtů je provedena pro čtvercové trubky o délce stěny 20 mm a tloušťce stěny 2 mm. Při analýze deformace průřezu trubky hranaté lze vycházet z poznatků o ohybu prizmatických tyčí ($b \times s$) uvedených v kapitole 2.2, na obr. 2.2.1. Poněvadž se jedná o dutý průřez s konkrétní tloušťkou stěny lze přihlídnout k poznatkům o ohybu trubek kruhových. S určitým přiblížením je možno definovat hlavní technologické parametry R/D a D/S nahrazením průměru D za výšku h . Je ovšem patrný rozdílný tvar vůči kruhovému průřezu. U čtvercového průřezu rohy představují tuhostní prvky, které mají stabilizační efekt vůči možnému „borcení“ profilu.[6]



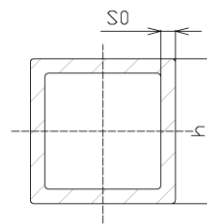
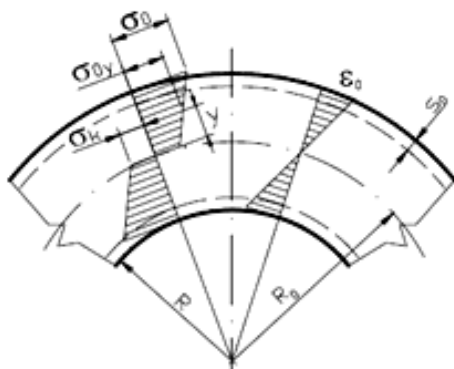
Obr. 3.0.1: Rohy představující stabilizační prvky

3.1 Parametry ohybu trubek čtvercového profilu

Parametry jsou odvozeny od trubek kruhového profilu a jsou aplikovány na čtvercový průřez znázorněný na obr. 3.1.1

- relativní tloušťka stěny $\frac{S_0}{h}$ (23)

- relativní poloměr ohybu $\frac{R}{h}$ (24)



Obr. 3.1.1 Rozložení napětí a deformace při ohybu trubek čtvercového profilu

Konkrétní výpočty

pro trubky čtvercového profilu délky strany $h=20\text{mm}$ tloušťkou stěny $s=2\text{mm}$ a dané poloměry ohybu.

- relativní tloušťka stěny dosazení do vzorce (23)

$$\frac{S_o}{h} = \frac{2}{20} = 0,1$$

Hodnota poměru leží na hranici mezi tenkostěnnými a tlustostěnnými trubkami.

- relativní poloměr ohybu lze definovat poměrem dle vzorce (24) Pro daný poloměr ohybu trubky je poměr:

$$R_s=31 \quad \text{je} \quad \frac{R}{h} = \frac{31-10}{20} = \frac{21}{20} = 1,05$$

$$R_s=67 \quad \text{je} \quad \frac{R}{h} = \frac{67-10}{20} = \frac{57}{20} = 2,85$$

$$R_s=141 \quad \text{je} \quad \frac{R}{h} = \frac{141-10}{20} = \frac{131}{20} = 6,55$$

Pro $R_s=31$ vykazuje poměr extrémně ostrý ohyb s velkou pravděpodobností výskytu defektů i za použití podpůrných nástrojů jako jsou trny, vyhlazovací lišty...

$R_s=67$ je ohyb jasně ostrý ovšem za použití vnitřní stabilizace nehrozí zvýšený výskyt defektů. Podpůrné nástroje musí být správně nastaveny vůči ose kladky (rovině ohybu). Což blíže znázorňuje obr. 4.1.4. Rovněž poloha svaru musí odpovídat přibližně rovině kde $\varepsilon=0$

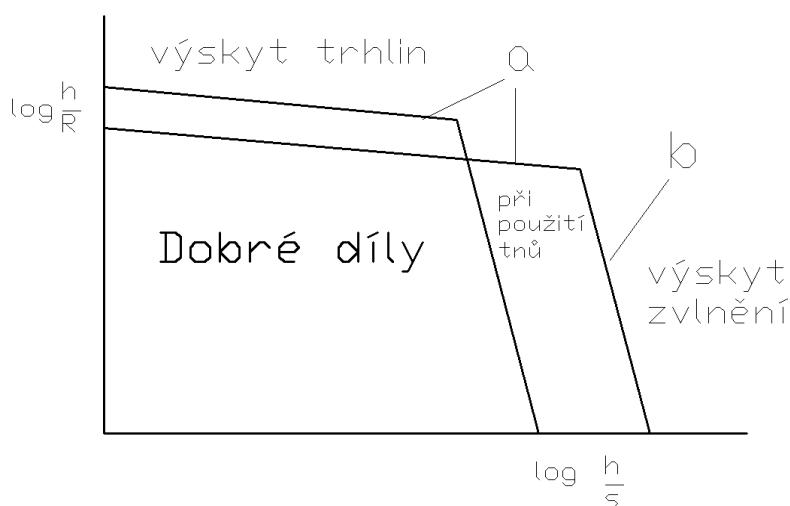
Pro $R_s=141$ je ohyb na hranici mezi volným a ostrým ohybem (dle parametrů trubek kulatých). Pro analýzu deformačního chování trubek čtvercových svařovaných lze předpokládat ostrý ohyb.

Mezi prostředky, které přispívají k hodnocení technologické tvařitelnosti a tedy k predikci výskytu defektů vzhledem k uvažovanému tváření, patří DMSP. Tyto diagramy umožňují predikci defektů již při konstrukci součástí. Jejich křivky definují hranice mezi díly vyrobenými za daných podmínek bez vzniku vad a díly, které bez defektu vyrobit nelze. Osový systém představují důležité parametry dílců ve formě jednoduchých poměrů, které mají souvislost s dějem v ohnisku deformace, kvantitou přetvoření atd. Jednoduché DMPS mají pouze křivky definující hranici vzniku jen jednoho defektu. Složitější DMSP obsahují i další křivky jak uvádí následující obr. 3.1.2. Na obr. 3.1.2 je uveden DMSP pro ohyb trubek Woodova typu dle [5] Je znázorněn v (log-log) souřadnicích.

Mezní křivky mocninného charakteru jsou zde reprezentovány přímkami a,b, kde:

- a) je mezní výskyt zvlnění,
- b) je mezní výskyt trhlin.

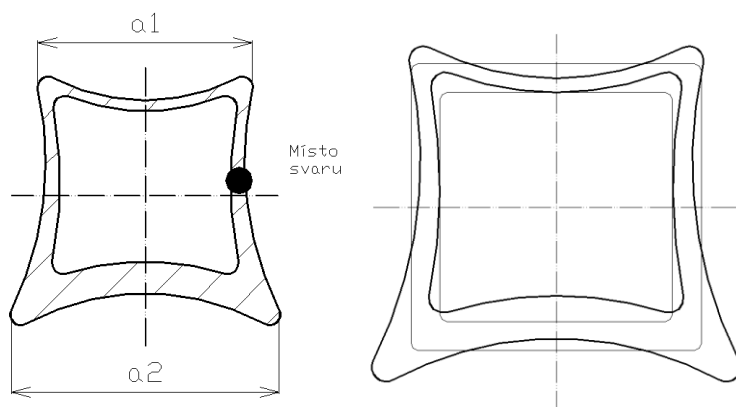
Mezi křivkami se nachází pole dobrých dílů. Vhodnou změnou parametrů ohybu se pole dobrých dílů zvětšuje. Sestavení mezních přímek vyžaduje velké množství experimentů. [5], [8]



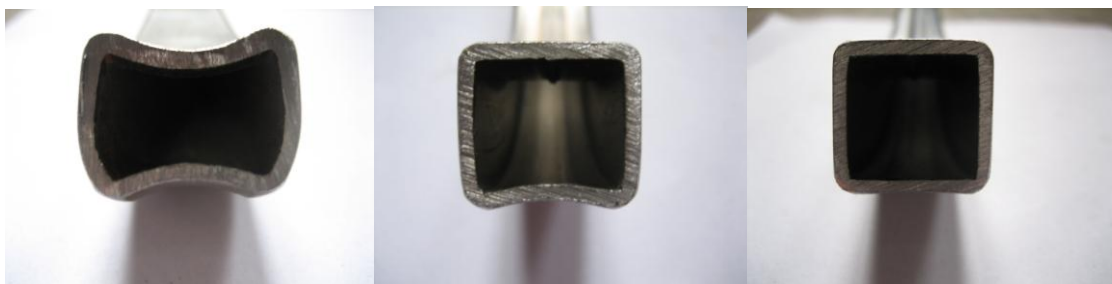
Obr. 3.1.2 Diagram závislosti parametrů ohybu a tvorby defektů [5]

3.2 Borcení příčného průřezu

Dle zkušeností a na základě prováděných zkoušek v rámci DP se prokazuje, že dochází k borcení příčného průřezu v souladu s ohybem úzkých plných pásů Obr 2.2.1. Příčinou změny je stav deformace, který je trojosý. Deformace příčného průřezu je charakteristická snahou materiálu téci do boků a zúžením tahové stěny. Platí tedy $a_2 \geq a_1$ a to je v souladu s obr. 2.2.1 (ohyb prizmatické tyče). Rozdíl mezi dutým a plným čtvercovým profilem je snaha tlakové stěny o zborcení se dovnitř profilu viz. Obr. 3.2.1.[6]



Obr. 3.2.1 Deformace příčného průřezu



Obr. 3.2.2 Ukázka deformovaného průřezu (zleva) $R_s=31$, $R_s=67$, $R_s=141$

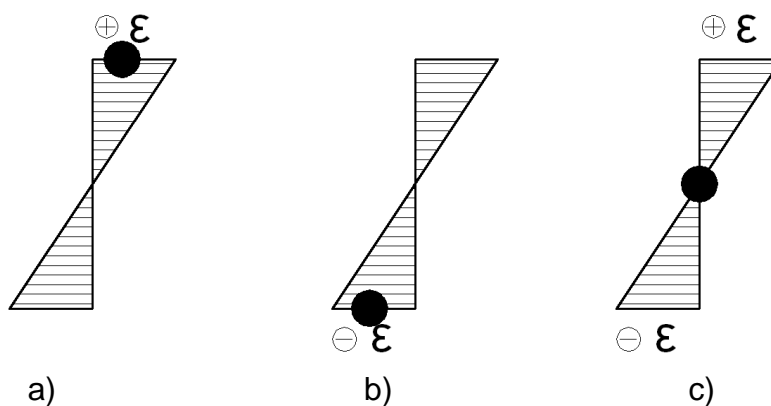
3.3 Poloha svaru při ohýbání

Jde o trubky svařované vysokofrekvenčním svařováním se švem umístěným ve středu jedné ze stěn čtvercové trubky. Při ohybu je důležitá poloha švové stěny, neboť stěna ve které je umístěn svár má rozdílné mechanické vlastnosti. Mohou nastat tři případy namáhání švové stěny a to v závislosti na poloze této stěny vzhledem k rovině ohybu:

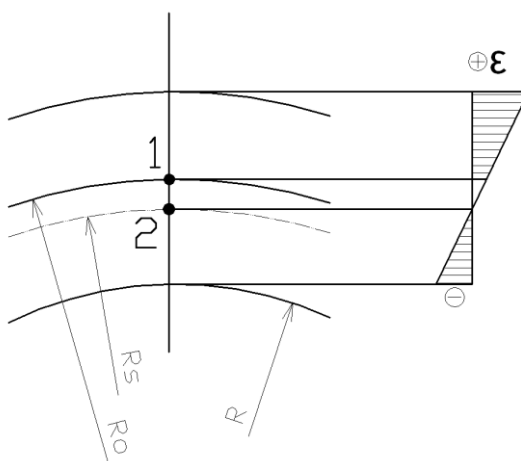
- Tlaková stěna (leží na vnitřní straně poloměru ohybu) Obr. 3.3.1a
- Tahová stěna (leží na vnější straně poloměru ohybu) Obr. 3.3.1b
- Neutrální stěna (svar ležící v neutrální ose ohybu kde $\varepsilon=0$) Obr. 3.3.1c

Na obr. 3.3.2. je znázorněna poloha neutrální osy ohybu kde je $\varepsilon = 0$ a poloha svarového švu za předpokladu, že svarový šev leží uprostřed stěny trubky.

- Při volném ohybu leží neutrální osa v ose švu a tedy $\varepsilon = 0$ je umístěn ve švu.
- Při ostrém ohybu se neutrální osa posunuje k tlakové stěně (vnitřnímu poloměru ohybu R) a na šev působí tahové napětí. Posun bodu $\varepsilon = 0$ k vnitřnímu poloměru je v souladu se změnou tloušťky stěny trubky dle obr. 3.4.1. Se změnou se posouvá poloha těžiště plochy příčného průřezu. Na obr. 3.3.2 svarový šev v bodě 1 a neutrální osa v bodě 2.



Obr. 3.3.1 Možné případy deformace působící na svarový šev

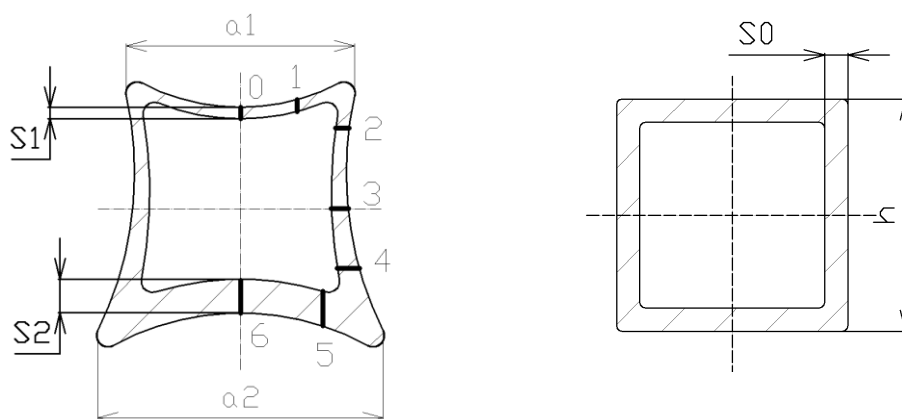


Obr. 3.3.2 Posun svarového švu vůči neutrální ose ohybu [1]

V potaz se musí brát mechanické vlastnosti svaru. Jak vyplývá z tahových zkoušek, svarový šev má vyšší pevnost v tahu a nižší tažnost. Umístění svaru má vliv na kvalitu ohybu a ovlivňuje parametry zvláště při extrémních ohybech. Ideální umístění svarové stěny je do neutrální osy kde je $\varepsilon = 0$. Jde-li však o ohyb ostrý, a to je při ohybu čtvercového profilu obvyklé, na svarový šev působí tahové napětí. Při 2D ohybu lze vždy zajistit polohu svarové stěny v neutrální ose, kde zhoršené mechanické vlastnosti nemají takový vliv na ohyb. Ovšem při 3D ohybu nelze tuto ideální polohu v neutrální ose zajistit. Zkoušky pro extrémní ohyb prokázaly jako výhodnější umístit svar do tahové stěny nežli do tlakové.

3.4 Ztenčení vnější stěny namáhané tahem

Ztenčení stěny trubky nastává v oblasti vnějšího poloměru ohybu (na vnější stěně trubky), neboť je zde největší tah. Na vnitřním poloměru R působí tlak a dochází zde k nárůstu tloušťky stěny trubky. Ztenčení roste se zmenšením poloměru ohybu, případně se zvětšením průměru trubky. U čtvercových trubek na rozdíl od kruhových je nelineární jak ukazuje graf č.1



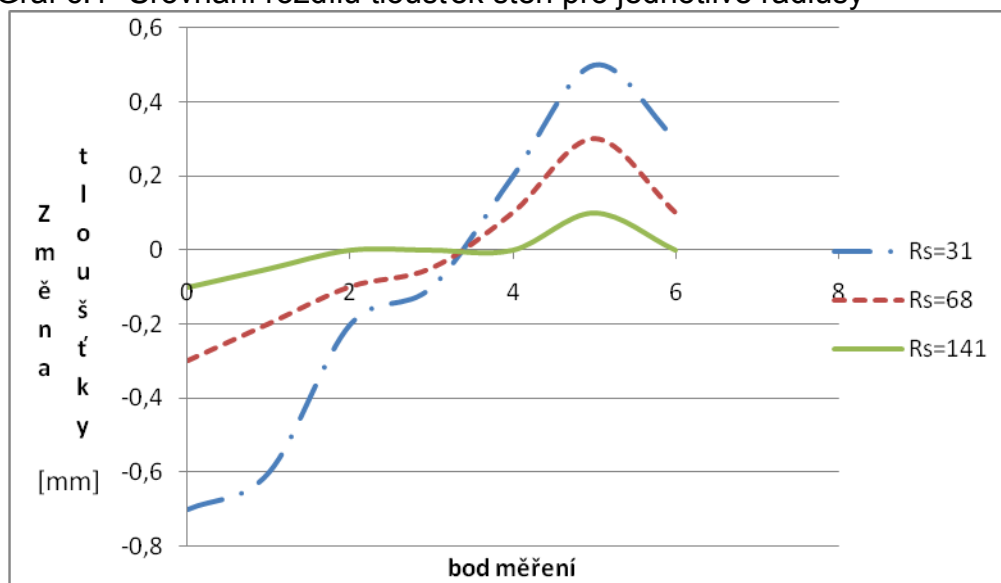
Obr. 3.4.1 Změny tloušťky tlakové a tahové stěny

Tab. č. 1: hodnoty tloušťky stěny pro jednotlivé rádiusy

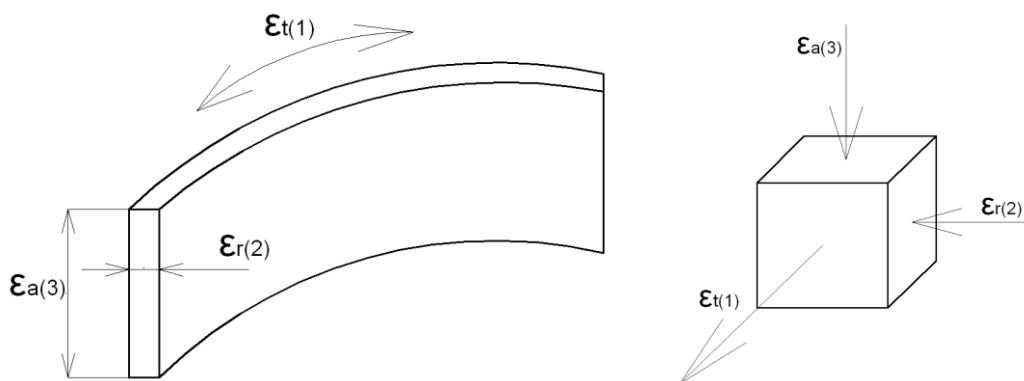
Oblast měření	0	1	2	3	4	5	6
Δs pro $R_s=31$	-0,7	-0,6	-0,2	-0,1	0,2	0,5	0,3
Δs pro $R_s=67$	-0,3	-0,2	-0,1	-0,05	0,1	0,3	0,1
Δs pro $R_s=141$	-0,1	-0,05	0	0	0	0,1	0

Hodnoty do tabulky č. 1 byly odebrány ze vzorků dle obr. 3.4.1 a byla uvedena jejich průměrná hodnota.

Graf č.1- Srovnání rozdílů tloušťek stěn pro jednotlivé rádiusy



Plynulému toku materiálu brání oblast rohů. Z grafu je viditelné, že největší nárůst materiálu je v oblasti rohů tlakově zatížené stěny.

Obr. 3.4.2 Definice ϵ pro tahovou stěnu trubky

Přetvoření ε je možno vyjádřit následovně. Vycházíme z předpokladu rovinné deformace, kdy osově přetvoření je dáno vztahem (17).

Radiální přetvoření ve směru tloušťky stěny počítáno dle vzorce (21). S_{\min} dosazeno z tab. 1.

$$\text{pro } R_s=31 \quad \varepsilon_{r(2)\max} = 1 - \frac{1,3}{2} = 0,35 \rightarrow 35\%$$

$$\text{pro } R_s=67 \quad \varepsilon_{r(2)\max} = 1 - \frac{1,8}{2} = 0,1 \rightarrow 10\%$$

$$\text{pro } R_s=141 \quad \varepsilon_{r(2)\max} = 1 - \frac{1,9}{2} = 0,05 \rightarrow 5\%$$

maximální přetvoření krajního vlákna vnějšího poloměru ohybu:

$$\varepsilon_{t\max} = \frac{h}{2} \cdot \frac{1}{R_s} \quad (25)$$

$$\text{pro } R_s=31 \quad \varepsilon_{t(1)\max} = \frac{h}{2} \cdot \frac{1}{R_s} = \frac{20}{2} \cdot \frac{1}{31} = 0,322 \rightarrow 32,2\%$$

$$\text{pro } R_s=67 \quad \varepsilon_{t(1)\max} = \frac{h}{2} \cdot \frac{1}{R_s} = \frac{20}{2} \cdot \frac{1}{67} = 0,149 \rightarrow 14,9\%$$

$$\text{pro } R_s=141 \quad \varepsilon_{t(1)\max} = \frac{h}{2} \cdot \frac{1}{R_s} = \frac{20}{2} \cdot \frac{1}{141} = 0,071 \rightarrow 7,1\%$$

Ztenčování stěny je velmi těžké potlačit. Pro rádiy $R_s=67$ a $R_s=141$ je ztenčení přijatelné pro $R_s=31$ je ztenčení 35% tento kritický parametr ukazuje na možnou tvorbu trhlin.

4 KONSTRUKČNÍ PRVKY NÁSTROJOVÉ SEKCE

Při komplexním pohledu na konečné dílce z trubek je ohýbání jedním z mnoha faktorů, které se zúčastňují výroby celého dílce. Zvláště ve velkosériové výrobě se projevují často zanedbatelné faktory, které jsou v kusové výrobě často opomíjeny. Jedním z velmi důležitých požadavků u velkosériové výroby je cena konečného výrobku.

Faktory ovlivňující technologii ohýbání:

Některé faktory ovlivňující technologii ohýbání lze do určité míry pozměnit na základě dodaných technologických podmínek, např. nákup polotovarů s menšími úchylkami tvarů. Zpravidla nelze změnit technologii ohýbání, která je k dispozici, na druhé straně lze vyjednat snížení poloměrů ohybů a úhlu ohybu. Dále je možné určit polohu svarové stěny (švu) a technologii výroby svařované trubky.

Nicméně kvalita ohybu z hlediska přesnosti a minima defektu je ovlivněna náhradím. Proto bude v dalším vysvětlena funkce, tvar a uplatnění nástrojů.

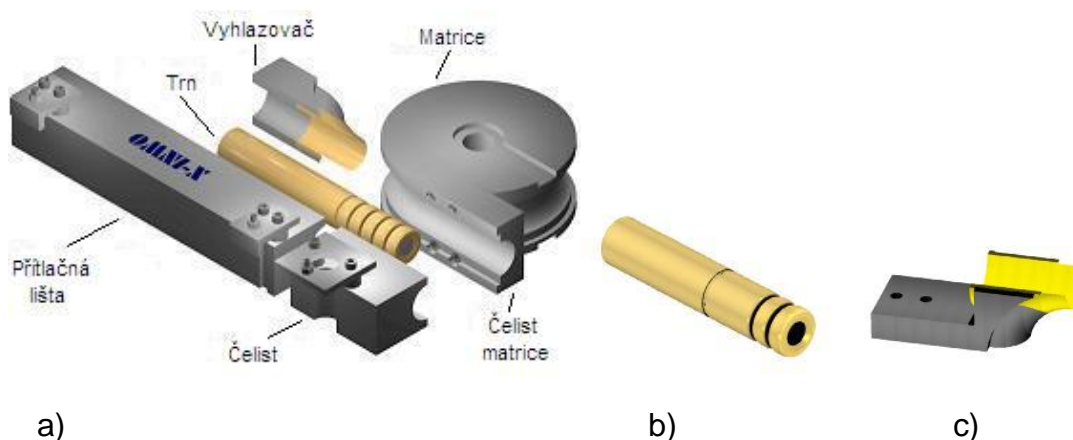
Mezi faktory, které ovlivňují proces ohybu, patří technologie, kterou je ohyb prováděn. Základní způsoby ohýbání trubek:

Pro ohýbání tenkostěnných trubek je zapotřebí navíc ještě trn a vyhlazovací lišta. Trn minimalizuje propadnutí trubky a vyhlazovací lišta zabraňuje zvrásnění trubky na vnitřní straně ohybu.

Nejlepší variantou při koupi nástrojů je nákup matrice, čelisti a přitlačné lišty současně, čímž je zabráněno nesrovnalostem se zapadnutím jednotlivých dílů do sebe. Pokud jednotlivé nástroje do sebe přesně nezapadají, ohyby nikdy nebudou konzistentní a mohou se objevit známky poškození na vnější straně trubky.

Neméně důležitou složkou každého ohýbání je dobré mazání, ať již pomocí olejů, tuků či mazacích past. Volba mazadla závisí na materiálu ohýbané trubky. Jeho množství nanášené na trn a dovnitř trubky je v podstatě neomezené, ale pro správné ohýbání je nutné se vyhnout znečištění matrice a čelisti. Množství obvykle i určuje, jak dobrý ohyb bude.[7], [11], [12]

4.1 Přípravky a nářadí pro ohýbání

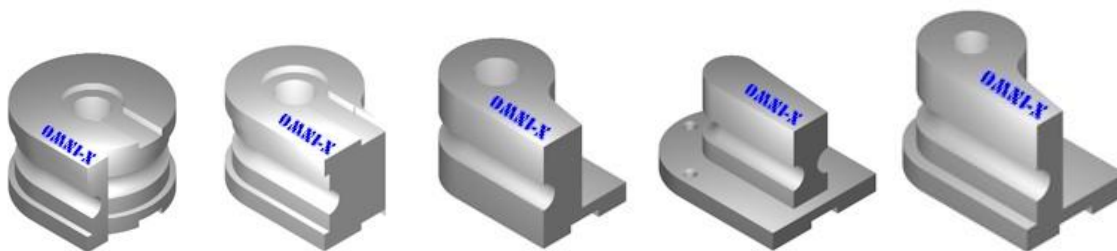


Obr. 4.1.1 a) Díly upínacích a ohýbacích přípravků pro ohýbací stroje, b) trn, c) Vyhlažovací lišta [12]

4.1.1 Matrice

Je jedním ze základních nástrojů určující poloměr ohybu trubky. Bývá vyrobena z nástrojové oceli či slitiny a tepelně zpracována nebo nitridována, což závisí na konkrétních požadavcích.

Rozlišujeme několik typů matic. Konkrétní volba typu matrice záleží na průměru trubky, poloměru ohybu a také na použité ohýbačce.



Obr. 4.1.2: Základní typy matic [11]

Při výběru matrice je nutné se rozmyslet, zda je požadován precizní nebo komerční nástroj. Pokud je ohýbaná silnostěnná trubka na velkých poloměrech ohybu, postačí méně nákladné nástroje. Naopak při ohýbání pro letecký průmysl nebo tenkostěnných trubek bude potřeba nástroje, které budou ve vyšší přesnost a budou cenově dražší.

Neméně důležitým prvkem, ovlivňujícím kvalitu ohybu, je délka a povrch čelisti matrice. Povrchová úprava čelisti matrice závisí na konkrétním užití, možnosti úpravy jsou opískování, karbidový nástřik a vroubkování.

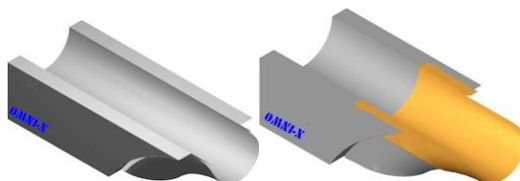
Čelist má stejnou délku i povrchovou úpravu jako čelist matrice. Její hlavní funkcí je přidržovat trubku v průběhu celého ohybu bezpečně přitlačenou k čelisti matrice.

Přítlačná lišta udržuje konstantní tlak mezi trubkou a maticí, vyvíjí stálý tlak na trubku v tangenci (funkčním bodě), kde vzniká ohyb. Délka přítlačné lišty závisí na stupni ohybu (DOB) části, která je ohýbána.[7], [11], [12]

4.1.2 Vyhlazovací lišta

Její základní funkcí je zabraňovat vrásnění trubky na vnitřní straně ohybu. Vyhlazovací lišta se upevňuje do drážky matrice a to do blízkosti funkčního bodu (tangenty). Velmi důležitým faktorem pro správné fungování vyhlazovací lišty je materiál, z kterého je vyrobena. Pro ohýbání trubek z hliníku, mědi a měkké oceli se používají ocelové vyhlazovací lišty, zatímco pro nerezové a titanové trubky se užívají vyhlazovače z ampaca. Aby se zmenšilo tření mezi vyhlazovací lištou a trubkou, mohou být ocelové vyhlazovací lišty

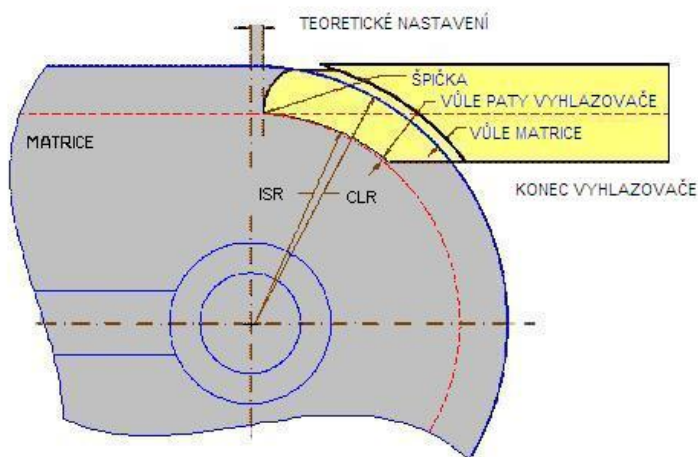
pochromovány. Pro životnost vyhlazovací lišty i kvalitu ohybů je nejdůležitější správné nastavení.[7], [11], [12]



Obr. 4.1.3 Základní typy vyhlazovacích lišt [11]

Vkládané vyhlazovací lišty s výměnnou vložkou se užívají hlavně v automobilovém průmyslu s velkým objemem produkce.

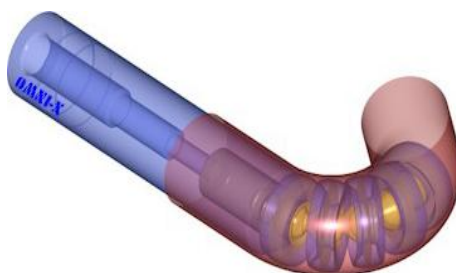
Nastavení vyhlazovací lišty



Obr. 4.1.4 Nastavení vyhlazovací lišty [12]

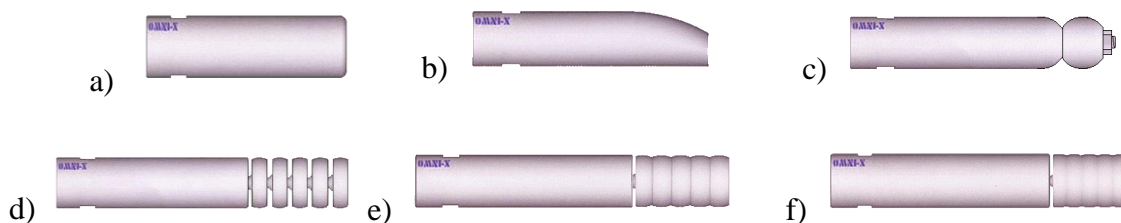
4.1.3 Trny

Základním prvkem pro potlačení defektů je vnitřní výplň trubky. Pro velkosériové účely je nejvhodnější trn.

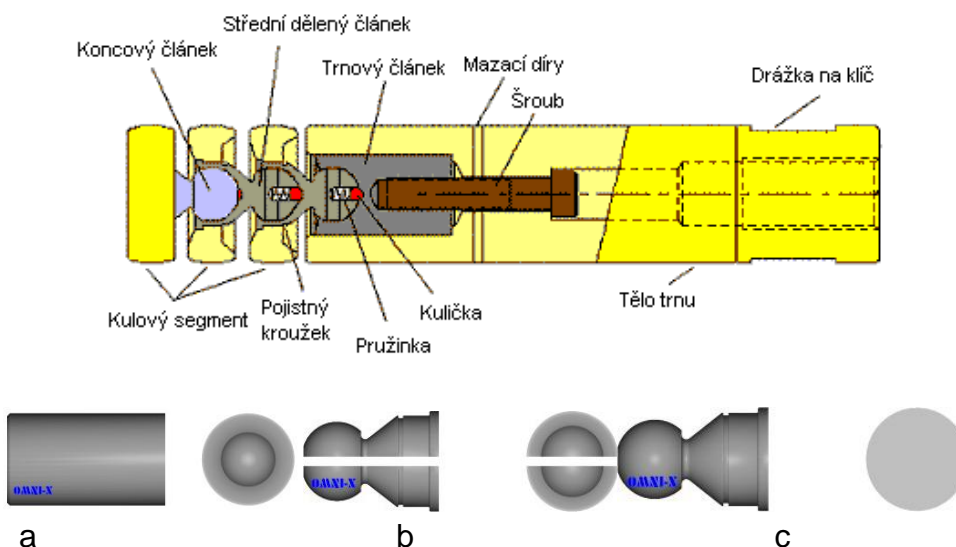


Obr. 4.1.5 Znázornění trnu [12]

Jeho primární funkcí je chránit trubku před zhroucením vnější a vnitřní strany dovnitř čtvercové trubky. U kruhových trubek pak k zploštění trubky. Nabízíme několik typů trnů pro specifické potřeby:



Obr. 4.1.6 Ukázka typů trnů [11]



Obr. 4.1.7 Zobrazení jednotlivých částí trnu: schéma celého trnu, a) trnový článek, b) střední článek, c) koncový článek [11]

Správná volba trnu je opět klíčová pro kvalitu výsledného ohybu.

Základní typy trnů:

2. **Jednoduchý trn** - používá se pro silnostěnné trubky a velké poloměry ohybu.
3. **Jednoduchý formovaný trn** - stejný jako jednoduchý trn, jen s tvarovaným koncem tak, aby přesně kopíroval poloměr ohybu, a proto poskytuje větší oporu uvnitř trubky.
4. **Standardní (kuličkový) trn** - nejrozšířenější užití. Standardní trn má jednu kuličku, může jich však mít i více. Standardní trn je nejvíce odolným ze tří ohybných trnů, protože užívá největší velikost článků.
5. **Tenkostěnný trn** - je vhodný pro tenkostěnné trubky. Tyto trny mají stejný typ spojovacích článků jako standardní trny, jen s tím rozdílem, že ty pro tenkostěnné trny jsou o jednu velikost menší než by byly články u standardních trnů.

6. **Ultra tenkostěnný trn** - se používá pro trubky s velmi tenkou stěnou. Používají stejný typ spojovacích článků jako standardní trny, ale o 2 velikosti menší. [7], [11], [12]

4.2 Technická data a specifikace ohýbačky UNISON MG 2790



Obr. 4.2.1 Ohýbačka Unison MG 2790 [11]

A) Kapacita ohýbacího stroje:

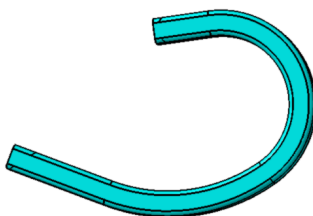
- Ohýbací moment: **3500Nm**
- Maximální velikost ohýbaných trubek vnější průměr 40mm,
- Maximální délka ohýbaných trubek pro průběžné upnutí: 3300mm
- Maximální délka ohýbaných trubek pro upnutí s dorazem v kleštinách: 2100mm

C) Přesnost a rychlosti ohýbání stroje:

- Nejmenší vzdálenost mezi ohyby: 0.05mm, rychlost: 1m/sec max
- Rovina ohybu: 0.05 deg, rychlost: 360deg/sec max
- Stupeň ohybu: 0.05 deg, rychlost: 180deg/sec

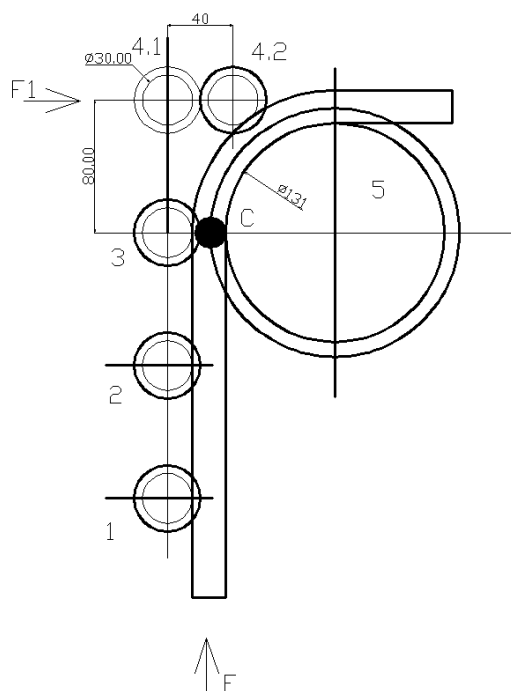
5 SILOVÝ ROZBOR OHÝBÁNÍ

Tento rozbor je provedený pro konkrétní součást zobrazenou na obr. 5.0.1 a technický výkres viz. příloha 1. Tato součást se skládá ze dvou tangenciálně navazujících poloměrů $R131$ a $R57$. Právě těmito ohyby se budeme podrobně zabývat.



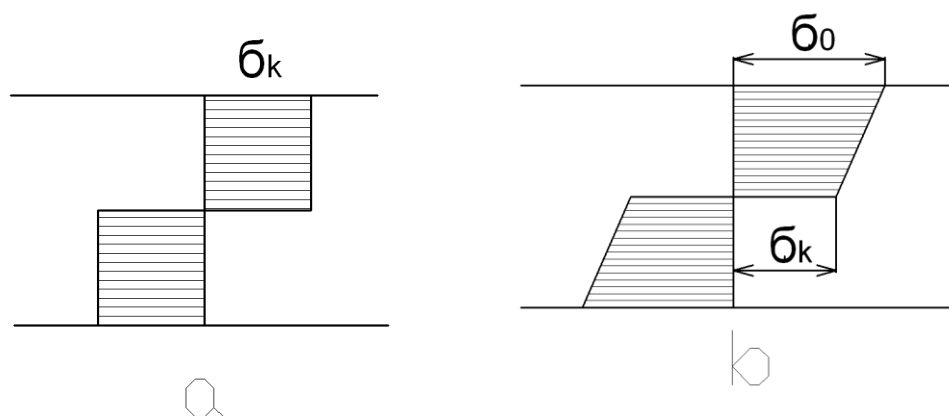
Obr. 5.0.1 Ukázka ohýbaného dílu

Níže popsany princip tlačného ohýbání, který je zobrazen na Obr. 5.0.2. Tímto způsobem se ohýbá rádius $R_S=141$. Princip ohybu se skládá ze dvou fází a je následný: Fáze 1: nasunutí trubky na „trn“, přitlačení trubky kladkami 1,2,3,4 ke kladce 5, kladka 4 se posune z polohy 4.1 do polohy 4.2 silou F_1 , Fáze 2: tlačná síla F působící na konci trubky, trubku ohne zakružovacím způsobem na požadovaný tvar. Na schématu b) jsou čísla 1, 2, 3 znázorněny podpěrné kladky číslem 5 matrice podle které je uskutečněn ohyb a číslem 4 je znázorněna ohýbací kladka jejíž zdvih je ovládán strojem a vyvozuje ohýbací sílu. Na tomto obrázku bod C pod kladkou 3 představuje ohnisko deformace kde v průřezu trubky vznikne příslušný průběh ohybového napětí. Rádius $R_S=67$ je ohýbán výkyvným ramenem dle schématu 5.1.3.



Obr. 5.0.2: Princip ohýbání tlakovou silou

Neboť poměr R/h je kolem 7 je možno konstatovat že se jedná o téměř ostrý ohyb. Proto mohou nastat 2 průběhy napětí v ohybu. Na obr. 5.0.3a je znázorněn průběh napětí v ostrém ohybu bez zpevnění a na obr. 5.0.3b je průběh napětí v ostrém ohybu, kdy materiál vykazuje zpevnění.



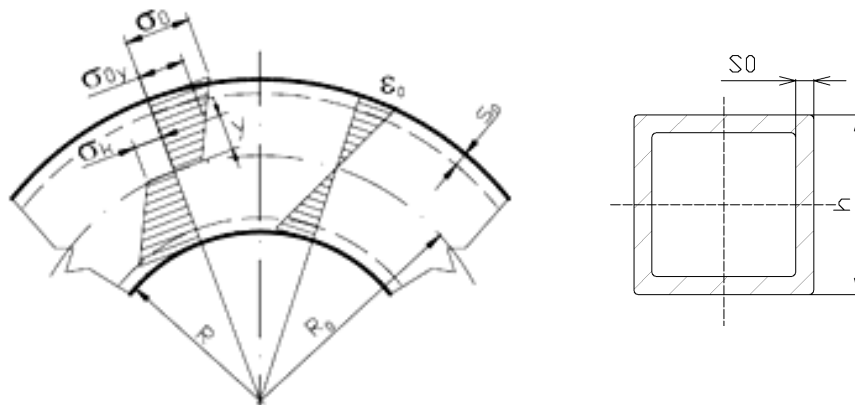
Obr. 5.0.3 Napětí při ostrém ohybu [13]

Pro náš případ volíme průběh napětí dle obr. 5.0.3a, důvodem volby jsou tahové zkoušky (v kapitole 6) které nevykazují zpevnění.

5.1 Ohybový moment

Výpočet ohybového momentu je důležitý především pro konstrukční řešení ohýbacího nástroje, resp. ke správnému naddimenzování částí jež budou moment přenášet. Základem tohoto výpočtu je rovnost vnějších a vnitřních ohybových momentů. Konkrétní zkoumaný vzorek v této práci má rozměr $h=20$ mm a tloušťka stěny $s=2$ mm. Jelikož se jedná o 2D ohyb kde lze zajistit ideální polohu svaru jsou ohybové momenty počítány pro tuto variantu. Jsou zkoumány tři druhy materiálů dle EN 10305-5, UNI ISO EN E190, UNI ISO EN E220, UNI ISO EN E235,

Viz. Příloha 1, 2, 3



Obr. 5.1.1 Aproximovaný průběh osového napětí při ostrém ohybu trubky

5.1.1 Ohybový moment v případě zpevnění materiálu

Pro danou problematiku ohybu je uvažována napěťová charakteristika na obr. 5.0.3b

Ohybový moment vnitřních sil vyplývá z řešení obecné rovnice dle [5]:

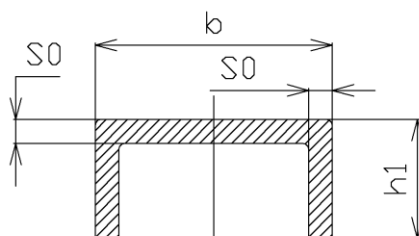
$$M = 2\sigma_k \int_0^{h/2} b \cdot y \cdot dy \quad (27)$$

Uvažuje-li se aproximované lineární rozložení osového ohybového napětí při celkem ostrém ohybu, jak znázorňuje na obr. 5.0.3a, pak s přihlédnutím k tomu, že osově napětí definuje rovnice:[3]

$$\sigma_0 = \sigma_k + \bar{D} \cdot \varepsilon_0 \quad (28)$$

$$D - \text{modul zpevnění : [MPa]} \quad \bar{D} = \frac{2}{n+1} \cdot K \cdot n^n \quad (29)$$

Pro symetrii dílu se počítá moment pro horní polovinu dílu. Pro druhou polovinu je totožný.



Obr. 5.1.2 horní polovina symetrického profilu

Z výše uvedeného jasně vyplývá, že vnitřní moment je získán integrací.

$$M_v = 2 \cdot \left(2 \cdot \int_0^{h1-s0} \left(\sigma_k + \bar{D} \cdot \frac{y}{R_0} \right) \cdot s_0 \cdot y \cdot dy + \int_{h1-s0}^{h1} \left(\sigma_k + \bar{D} \cdot \frac{y}{R_0} \right) b \cdot y \cdot dy \right) \quad (30)$$

5.1.2 Výpočet ohybového momentu pro případ nezpevňujícího materiálu

Výpočet ohybového momentu vnitřních sil je vypočítán pro konkrétní, výše uvedený rozměr trubky a výše uvedený materiál. Jelikož materiál nevykazuje zpevnění zanedbává se kvadratický moment vůči těžišti a vnitřní ohybový moment má tvar (viz níže vztah č. 31) Z tohoto vnitřního momentu je vypočtena

velikost síly F_1 , která vyvozuje první ohyb trubky. Následuje druhá fáze ohybu, ta je způsobena tlačnou silou F na konci trubky.

Výpočet vyjde z obecného vztahu:

$$Mo_{vn} = \sigma_k \cdot S_M \quad (31)$$

S_M - je v daném případě statický moment duté trubky čtvercového profilu o tloušťce stěny a lze jej stanovit následovně:

$$S_M = \frac{h^3}{4} - \frac{(h - 2s)^3}{4} \quad (32)$$

σ_k – mez kluzu zjištěná dle tahových zkoušek viz kapitola 6

Po dosazení vzorce 32 do vzorce 31 dostaneme ohybový moment vnitřních sil pro trubku čtvercového průřezu:

$$Mo_{vn} = \sigma_K \cdot \frac{h^3}{4} - \frac{(h - 2s)^3}{4} \quad (33)$$

Ohybový moment vnitřních sil pro ocel EN E190 CR2

$$Mo_{vnE190} = 331,27 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,02^3}{4} - \frac{(0,02 - 2 \cdot 0,002)^3}{4} = 323,3195 Nm$$

Ohybový moment vnitřních sil pro ocel EN E220 CR2

$$Mo_{vnE220} = 376,2 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,02^3}{4} - \frac{(0,02 - 2 \cdot 0,002)^3}{4} = 367,1712 Nm$$

Ohybový moment vnitřních sil pro ocel EN E235 CR1

$$Mo_{vnE235} = 378,3 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,02^3}{4} - \frac{(0,02 - 2 \cdot 0,002)^3}{4} = 369,221 Nm$$

- a) Výpočet ohybové síly F_1 vychází ze vztahu pro první fázi ohybu poloměru $R_s=141$

$$M_{o_{vn}} = M_{o_{vněj}} \quad (34)$$

Dosazením do vzorce (26) kde (a_1) je vzdálenost ohybové kladky od ohniska ohybu

$$M_{o_{vněj}} = F_1 \cdot a_1 \rightarrow F_1 = \frac{M_{o_{vn}}}{a_1} \quad (35)$$

Za hodnotu (a) je dosazeno 0,08 jenž je rameno na které působí síla F_1

Výpočet ohybové síly F_1 pro ocel EN E190 CR2

$$F_1 = \frac{M_{o_{vnE190}}}{0,08} = \frac{323,3195}{0,08} = 4041,5N$$

Výpočet ohybové síly F_1 pro ocel EN E220 CR2

$$F_1 = \frac{M_{o_{vnE220}}}{0,08} = \frac{367,1712}{0,08} = 4589,6N$$

Výpočet ohybové síly F_1 pro ocel EN E235 CR1

$$F_1 = \frac{M_{o_{vnE235}}}{0,08} = \frac{369,2208}{0,08} = 4615,3N$$

- b) Stanovení síly F , která koná druhou fázi ohybu rádia $R_s=141$, rozbor je znázorněn na obr. 5.0.3. a použití vzorců (26), (34) a (35)

$$M_{o_{vněj}} = F \cdot a$$

a – je rameno na kterém působí síla F v našem případě 23,7mm

$$M_{o_{vn}} = M_{o_{vněj}}$$

Výpočet ohybové síly F pro ocel EN E190 CR2

$$F = \frac{M_{o_{vnE190}}}{0,0237} = \frac{323,3195}{0,0237} = 13642,2N$$

Výpočet ohybové síly F pro ocel EN E220 CR2

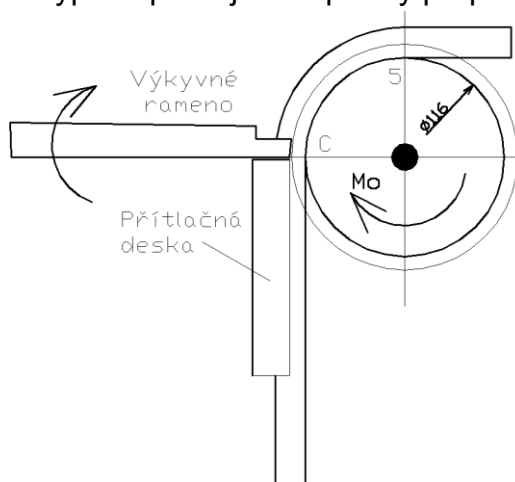
$$F = \frac{M_{o_{vnE220}}}{0,0237} = \frac{367,1712}{0,0237} = 15492,5N$$

Výpočet ohybové síly F pro ocel EN E235 CR1

$$F = \frac{M_{o_{vnE235}}}{0,0237} = \frac{369,2208}{0,0237} = 115578,9N$$

c) Stanovení ohybového momentu M_o pro rádius $R_s=67$

Tento postup aplikovaný na $R_s=67$ je prováděn navíjením. Přítlačné rameno přitlačí trubku v ose k matrici, na kterou působí ohybový moment vyvolaný servomotorem ze středu kladky. Rameno a matrice pak koná rotační pohyb kolem středu matrice a ohýbá trubku viz. Obr. 5.1.3. Tohoto ohybu se nezúčastňuje vnitřní výplň a proto je zde patrný propad tahové stěny.



Obr. 5.1.3 Schéma ohybu výkyvným ramenem

U navíjení je síla (F) v místě upnutí trubky ke kladce po jejím pootočení je dána rovnicí $M_k = r \cdot F$ (r -je poloměr kladky). Pak se přenesou trubkou až do místa ohybu, kde je sledován tzv. moment vnitřních sil. Zde -vnější ohybový moment síly (F) je $M_{vněj} = F \cdot h/2$ - protože síla (F) působí v ose trubky.

Pro stanovení ohybového momentu M_o vyvolaného servomotorem ve středu matrice 5 je použito vzorce (34).

$$M_{o_{vn}} = M_{o_{vněj}}$$

Ohybový moment M_o tvořený matricí pro ocel EN E190 CR2

$$M_{o_{vněj}} = 323,3195Nm$$

Ohybový moment M_o tvořený matricí pro ocel EN E220 CR2

$$M_{o_{vněj}} = 367,1712Nm$$

Ohybový moment M_o tvořený matricí pro ocel EN E235 CR1

$$M_{o_{vněj}} = 369,2208Nm$$

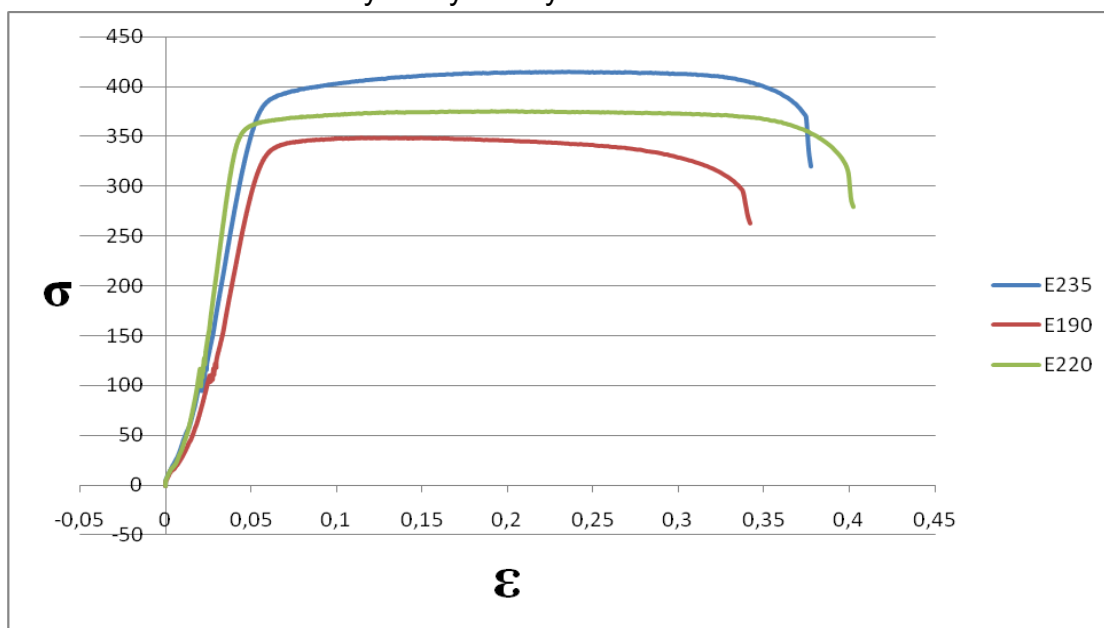
6 VÝSLEKY EXPERIMENTŮ A MĚŘENÍ

6.1 Tahová zkouška

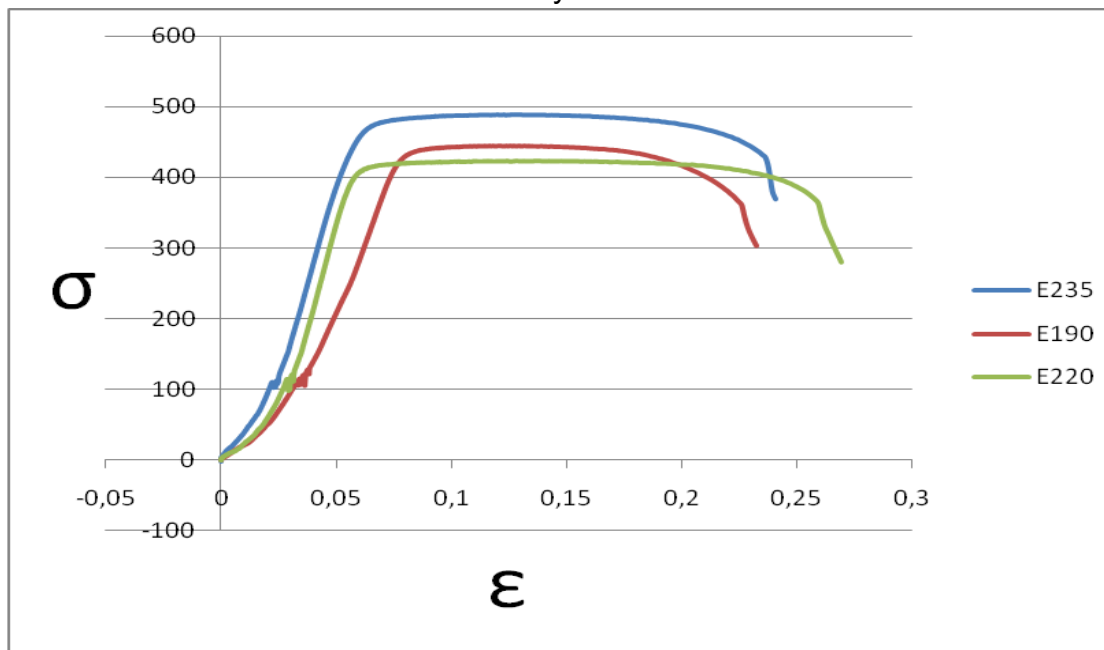
d) Hodnocení grafů

Tahové zkoušky byly pořízeny z každé stěny čtvercové trubky. Průměrné hodnoty tahových zkoušek pro každý materiál byly zjištěny ze tří pokusů. Graf č. 2 ukazuje srovnání materiálů dle tahových zkoušek pro stěnu bez svaru. Graf č. 3 znázorňuje tahové zkoušky pro stěny se svarem.

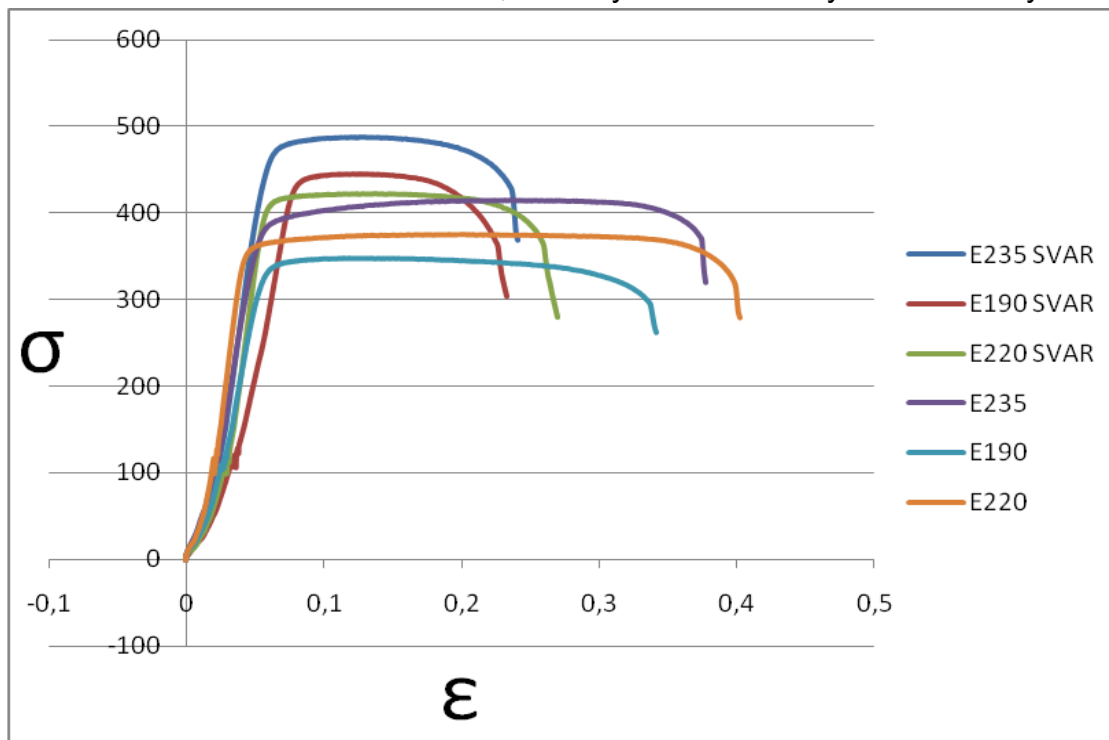
Graf č.2 Tahové zkoušky stěny trubky bez svaru



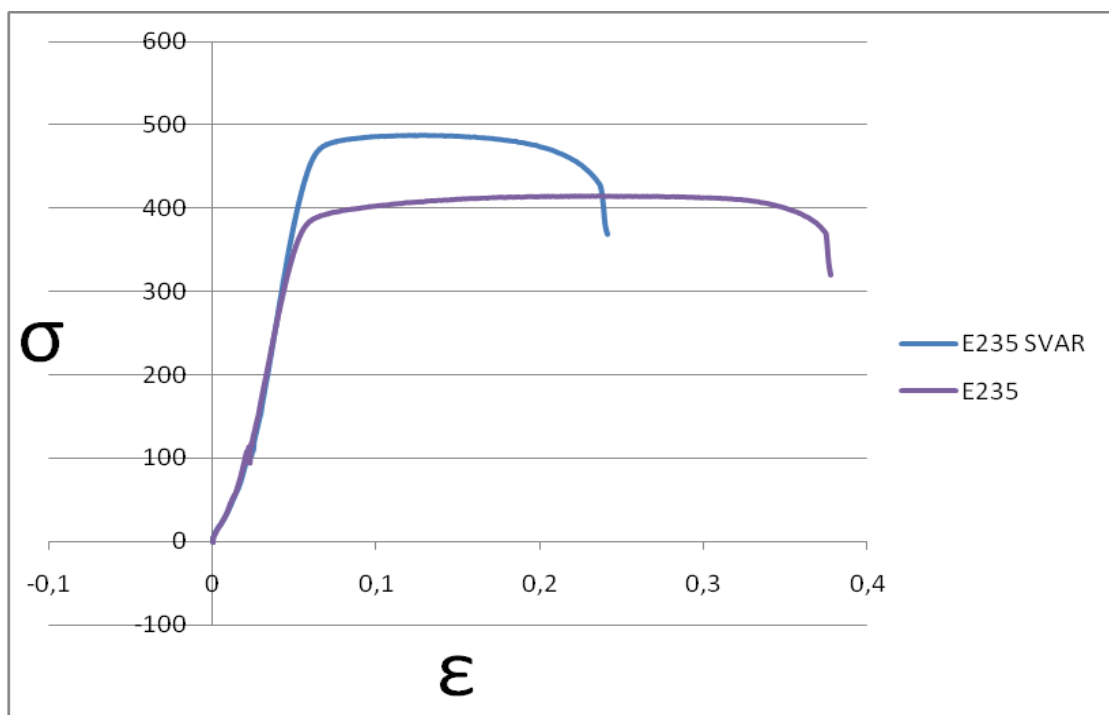
Graf č.3 Tahová zkouška svarové stěny



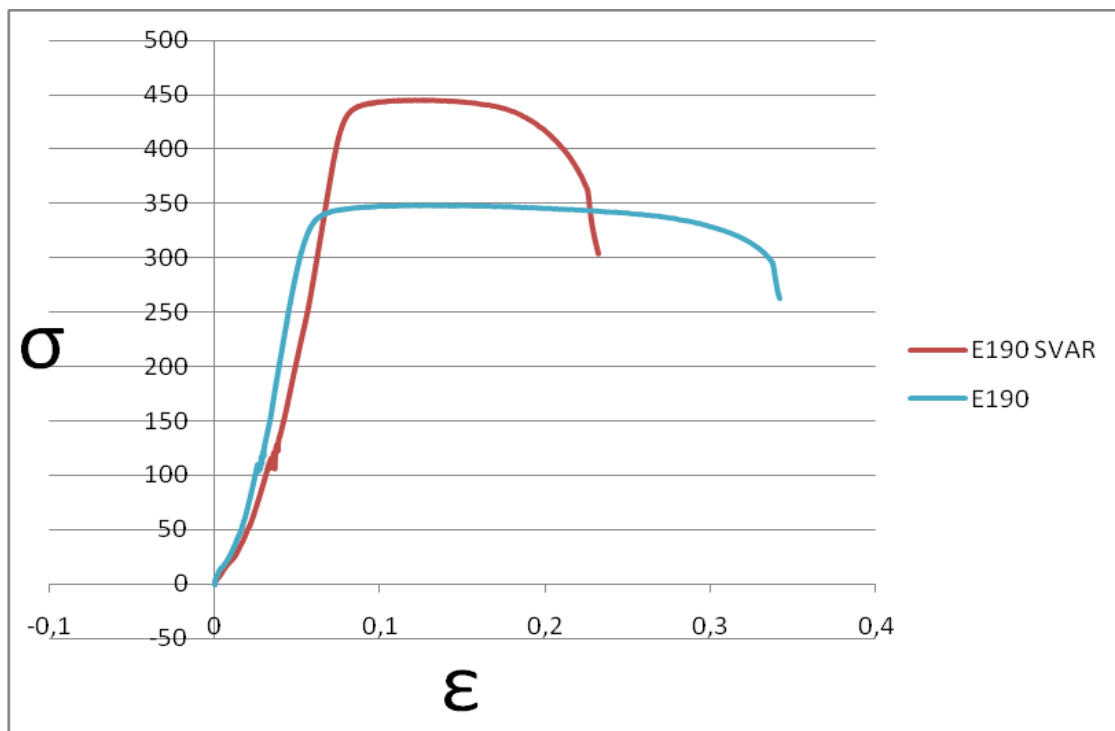
Graf č.4: Srovnání všech materiálů, svarových a nesvarových stěn trubky



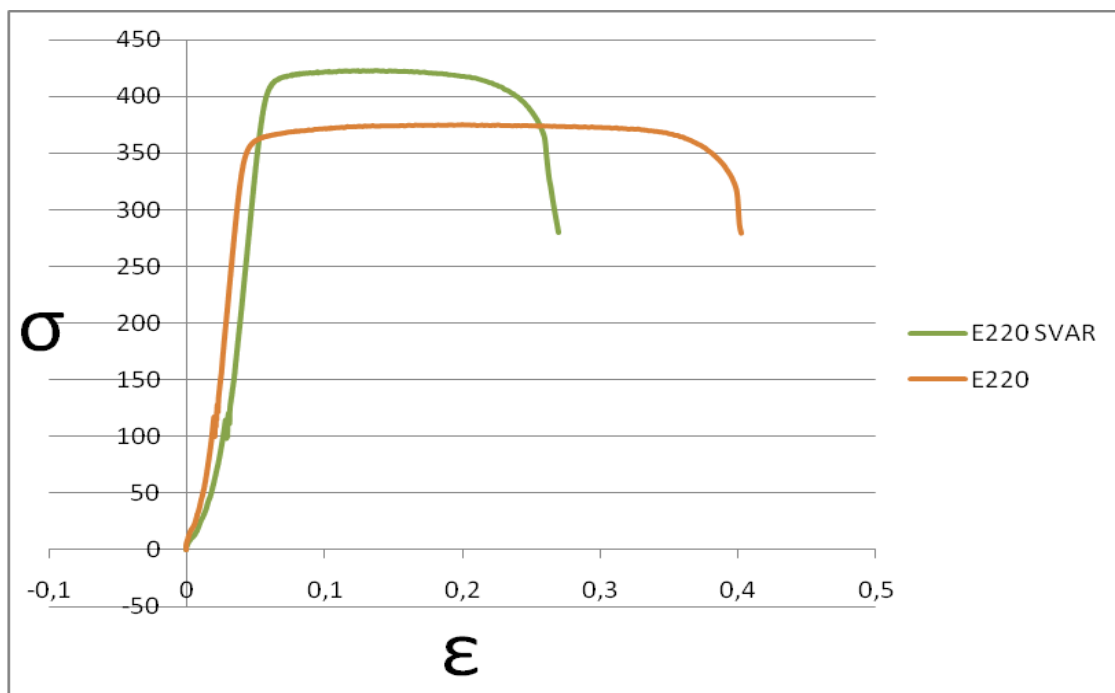
Graf č. 5 Tahová zkouška pro ocel E 235 ve svarové stěně a ve stěně bez svaru



Graf č. 6 Tahová zkouška pro ocel E 190 ve svarové stěně a ve stěně bez svaru



Graf č. 6 Tahová zkouška pro ocel E 220 ve svarové stěně a ve stěně bez svaru



Stanovení průměrných hodnot z tahové zkoušky pro každý materiál, a to pro svarovou stěnu a stěnu bezsvaru. Tabulka č.7.1.1 obsahuje výsledné hodnoty které jsou použity pro konkrétní výpočty v kapitole 5.

Tab. 6.1.1 Průměrné výsledky tahových zkoušek

Materiál	Rp02[Mpa]	Rm[Mpa]	A[%]
E190	331,27	349,58	33,00
E190 SVAR	418,32	424,77	21,50
E220	376,20	392,07	39,56
E220 SVAR	420,53	433,46	26,4
E235	378,30	418,80	37,00
E235 SVAR	457,92	488,90	24,33

Z diagramů porovnávajících vzorky se svarem a bez svaru vyplývá, že svar má vyšší hodnotu meze pevnosti ale mnohem nižší tažnost. Např při porovnání materiálu E 190 a E 220 vyplývá, že maximální přetvoření svarové stěny je 22-25%. Pro $R_s=67$ je poměrné prodloužení krajního vlákna $\epsilon_{t(1)\max}=14,7\%$. Z uvedeného plyne že svary mají dostatek plasticity a nehrozí prasknutí ani při ohybu s umístěním svarové stěny do tahového namáhání. Tuto hypotézu potvrdily i provedené testy. Nejlepší výsledky pro nahrazení žíhaného materiálu měla ocel E220, která má nejvyšší tažnost a zároveň nejmenší rozdíly meze kluzu pro svarovou stěnu a stěnu bez svaru. Právě tato ocel je nejvíce vhodná pro ohyb. Ovšem není zjištěno je-li vhodná pro navazující zpracování, kterým je svařování. Právě tato ocel je doporučena k následným experimentům.

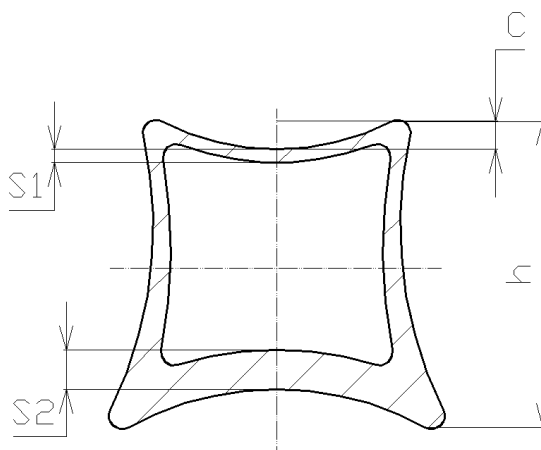
6.2 Deformace průřezu

Deformace dle obr. 3.2.1 a komentována v kapitole 3.2. Vyšší pozornost byla věnována ohybům $R_s=141$ a rádiu $R_s=67$, které jsou použity na konkrétní součástce vyráběné podnikem příloha č. 4. Mimo požadované zadání v rámci projektu standart budou zajištěny ohyby s menším poloměrem ohybu $R_s=31$ k zjištění chování materiálu při extrémním zatížení. Ohyby budou provedeny s výplní i bez výplně a u těchto vzorků bude podrobněji zkoumána změna tloušťky a deformace v příčném průřezu. Jako výplň bude použito močoviny. Výběr této výplně byl z důvodu nepoužitelnosti již hotového trnu, neboť by došlo k jeho destrukci.

U součástí užitých ke konstrukci závěsů pátých dveří automobilu je přípustná změna geometrie průřezu. Průhyb C viz obr. 6.2.1 je přípustný a změna výšky profilu h měřená přes rohy je přibližně rovna výšce h_0 a nemá vliv na funkci celkového výrobku. Změna průřezové deformace a hodnota C pro tahovou a tlakovou stranu poloměru ohybu R 57 a R131 je uvedena v příloze 6-23. Specifikace vzorku. (materiál, poloha svaru, rádius ohybu) je v tabulce 6.2.1. Orientace měření vzorků je v příloze č. 24 a je stejná pro přílohy 6-23.

Tab. 6.2.1 Specifikace měřených vzorků pro R 57, 131

Číslo měření	Materiál trubky dle EN 10305-5	Pozice sváru při ohybu	Poloměr ohybu R [mm]	Úhel ohybu	Příloha č.
19	E190	Tlakové zatížení	57	153	6
20	E190	Tahové zatížení	57	153	7
21	E190	Neutrální zatížení	57	153	8
22	E220	Tlakové zatížení	57	153	9
23	E220	Tahové zatížení	57	153	10
24	E220	Neutrální zatížení	57	153	11
25	E235+N	Tlakové zatížení	57	153	12
26	E235+N	Tahové zatížení	57	153	13
27	E235+N	Neutrální zatížení	57	153	14
28	E190	Tlakové zatížení	131	55	15
29	E190	Tahové zatížení	131	55	16
30	E190	Neutrální zatížení	131	55	17
31	E220	Tlakové zatížení	131	55	18
32	E220	Tahové zatížení	131	55	19
33	E220	Neutrální zatížení	131	55	20
34	E235+N	Tlakové zatížení	131	55	21
35	E235+N	Tahové zatížení	131	55	22
36	E235+N	Neutrální zatížení	131	55	23



Obr. 6.2.1 Deformace příčného profilu při ohybu

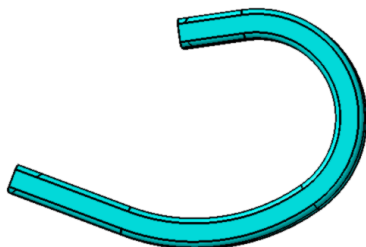
K vyhodnocování analýzy příčin „borcení“ příčného průřezu se zohledněním tuhosti rohů trubky by byla v dané práci pouze spekulativní. Tak jako u rámu kvadratického průřezu vznikají v rozích přídavné momenty, které mají genezi v nerovnoměrnosti rozložení napětí ve směru tloušťky materiálu. K „borcení“ průřezu přispívá též známé schéma deformace, které je uvedeno na obr. 2.2.1.

Jak bylo uvedeno „borcení“ potlačují vložky v podobě trnů. Výplně se pro výrobu této součásti nepoužívají, proto je zvlášť u poloměru $R_s = 67$ viditelná deformace tahové stěny viz. obr. 3.2.2 a přílohy 6-14.

Z časového omezení nebyla provedena podrobná analýza deformace pro jednotlivé ohyby.

7 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Technologičnost součásti R_{krit} , přijatelné deformace průřezu atd. ovlivňuje konstruktér již při návrhu součásti. Konstruktér volí poloměry ohybu polohy svarové stěny rozměry polotovaru a v neposlední řadě materiál a jeho tepelné zpracování. Právě na konstruktérovi závisí tato volba a on ovlivňuje obtížnost výroby a případně tvorbu defektů ohybu. Mezi dodavatelem a zákazníkem musí probíhat komunikace ohledně použitelnosti přípustných defektů, které rozšíří míru použitelnosti dílů. V automobilovém průmyslu, kde je ze strany zákazníků velký tlak na cenu a díly se vyrábí ve velkých sériích, se projeví i nepatrné ušetření. Z pohledu ekonomického posouzení se jedná o cestu výběru materiálu a tepelného zpracování. Nahrazení žíhaného materiálu nežíhaným tam, kde je možné zajistit polohu svaru v neutrální ose (převážně u 2D ohybů). Tam kde toto zajistit nelze (3D ohyby) se nevyhnutelně musí použít dražší žíhaný materiál. Polotovary dodávané v nestabilní kvalitě z hlediska polohy svaru ke středu rozměru h . Svary leží mimo osu trubky. Odchyšky jsou ± 2 mm mimo osu trubky. Tato asymetrie polohy svaru je dalším problémem, který ovlivňuje kvalitu hotových výrobků. Další úvaha je nad nákupem dražších polotovarů kde bude vždy zajištěna poloha svaru oproti času strávenému seřízením ohýbačky při každé nové dodávce polotovarů.



Obr. 7.0.1 Vyráběná součást

7.1 Zhodnocení nákladů

Níže uvedený bod zvratu a kalkulace jsou posouzeny pouze pro technologii ohýbání. Do výroby konečné součásti však vstupují další technologie a díly jejichž údaje nebyly zpřístupněny. Údaje byly upraveny o určitý koeficient aby nedošlo k prozrazení firemních tajemství.

Náklady na ohýbání a nástroje

- Pořizovací cena ohýbačky $C_{po} = 8925\ 000\ Kč$
 - Náklady na nástroje $C_{pn}=191\ 250\ Kč$
- Celkové investiční náklady: $C_p= C_{po}+ C_{pn}= 9116\ 250\ Kč$

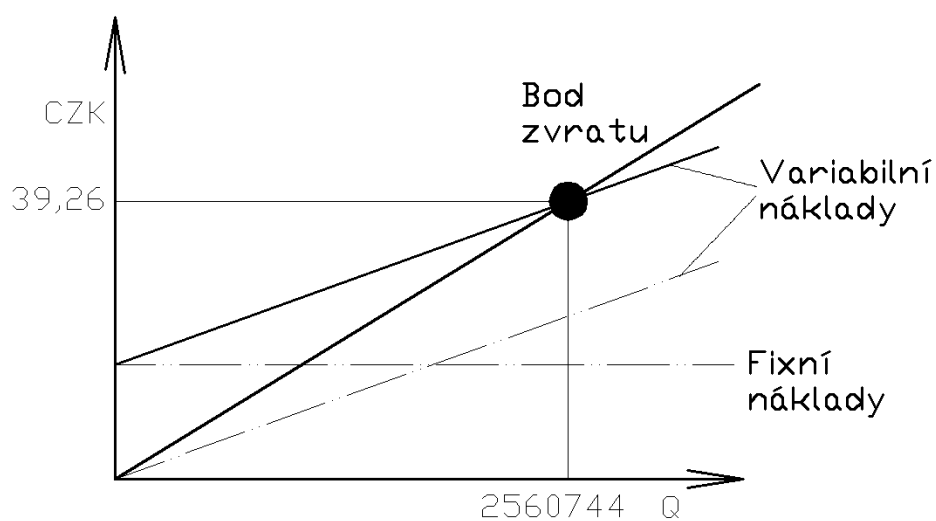
Náklady za materiál:	$N_m=25,9\ Kč/kus$
Výrobní kapacita ohýbačky	$N_H=100ks/1\ hodina$
Provozní náklady ohýbačky	$N_o=426\ Kč/hodina$
Hrubé mzdové náklady	$N_z=150\ Kč/hodina$

$$N_K = \frac{N_o + N_z}{N_H} + N_m = \frac{724,2 + 255}{100} + 25,9 = 35,7\ Kč / Ks$$

Přirážka na zisk v automobilovém průmyslu se pohybuje kolem 10%

Proto	$C_{pr}= N_K \cdot 1,1 = 35,7 \cdot 1,1 = 39,26\ Kč/ks$
Zisk z jednoho ks	$Z = C_{pr} - N_K = 3,56\ Kč/ks$

Návratnost investic	$N = C_p / Z = 9116250 / 3,56 = 2560744ks$
---------------------	--



Obr. 7.1.1 Graf bodu zvratu

Při dvou směnném provozu je návratnost 5,7 roků. Při tří směnném provozu, který je dle objednávek zákazníka potřebný vychází návratnost na 3,8 let.

7.2 Cenová kalkulace úspor při použití nežíhaného materiálu

Objednávky od zákazníka za první 4 měsíce roku 2010 činily 45 950 ks.

Rozdíl ceny na kus mezi žíhaným a nežíhaným materiálem je 0,1346 EUR.

Úspora za první 4 měsíce by činila 6185 EUR. To činí úsporu cca 18555 EUR za rok.

ZÁVĚR

Informace o kritických parametrech ohybu trubek (R_{min} , tvorba defektů...) čtvercového profilu je jak z hlediska literatury tak technologických návodek společností zabývajících se touto problematikou nedostatečná. Řada oslovených firem neposkytla tyto informace a poznatky z hlediska firemního tajemství. Práce spočívala v zajištění vzorků a provedení zkoušek, které byly časově náročné. Jelikož vytíženost měřících center je dosti vysoká, nepodařilo se vyhodnotit závěry ohledně deformace příčného průřezu čtvercového profilu. Na řešení nezodpovězených otázek se bude pokračovat v rámci projektu standart. Nicméně byla provedena analýza ohybu trubek kruhového a čtvercového průřezu. Dále byla provedena zkrácená analýza změny profilu průřezu čtvercové trubky. Ze silového rozboru a konkrétního stanovení sil potřebných pro ohyb zkoumaných materiálů vyplývá nevyužitelnost parametrů ohýbačky. Právě zkoumání parametrů ohybu pro nežíhané materiály přineslo kýžených výsledků a možnost použití nežíhaných materiálů pro konkrétní součástku. Nejlepší výsledky pro nahrazení žíhaného materiálu nežíhaným vykazuje ocel UNI EN ISO E 220 a úspora při použití tohoto materiálu je cca 19 000 EUR. Tahové zkoušky ukázaly vyšší pevnost svarové stěny a její nižší tažnost. Proto i přes možnou použitelnost svarové stěny v tahovém zatížení (na vnějším poloměru ohybu) je doporučení umisťovat svar do osy neutrální kde je $\varepsilon=0$.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SAMEK, Radko, NETUŠILOVÁ, Renata. *Návrh a ověření ohybu tenkostěnných trubek let. motorů*. VAAZ. 1. vyd. Brno : [s.n.], 1983. 56 s., 14.
- [2] ALTAN, Taylan. *The importance of the n value in sheet forming*. STAMPING JournalŽ [online]. 2001 [cit. 2003-10-14].
- [3] ŽÁK, Jan, SAMEK, Radko, BUMBÁLEK, Bohumil. *Speciální letecké technologie*. 1. vyd. Kyjov: Rektorát VUT v Brně, 1990. 219 s. ISBN 80-214-0128-1.
- [4] PETRUŽELKA, Jiří. *Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2000. 156 s. ISBN 80-7078-635-3.
- [5] HOSFORD, William F., CADDELL, Robert M. *Metal forming: Mechanics and metallurgy*. 2nd ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993. 329 s.
- [6] FOREJT, Milan, *Teorie Tváření*, vyd 2. Brno: CERM 2004 167 s. ISBN 80-214-2764-7
- [7] ZACHOVAL, Jan, *Návrh technologie výroby ohýbané součástí a konstrukční řešení nástroje*. Diplomová práce VUT FSI 2009, sr.72
- [8] SAMEK, Radko, ČALKOVSKÝ, A. *Tvorba Diagramů technologické tvařitelnosti s využitím definice skutečného napětí*. The 6th International conference on Formability 94, Ostrava 24-27 October 1994 Czech Republic
- [9] SAMEK, Radko, *Analýza mezního stavu plastyčnosti a technologické tvařitelnosti*. VAAZ Brno 1987, 78 stran.
- [10] ELFMARK, Jiří, *Tváření kovů*, SNTL Praha 1992, IBSN 80-03-00651-1
- [11] HÁJEK, Petr, *Interní příručka pro ohýbání Edscha Bohemia s.r.o.* 2009 [cit.2010-03-04]
- [12] Omnibend.com [online]. 2000 [cit.2010-03-04]. Dostupný z WWW: <http://www.omnibend.com/>
- [13] Ksp.tul.cz [online]. 1998 [cit.2010-03-04]. Dostupný z WWW: www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07
- [14] BLM Group [online]. 1999 [cit.2010-03-04]. Dostupný z WWW: <http://www.blmgroun.com>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
σ	[Mpa]	Napětí
ε	[-]	Přetvoření
$\varepsilon_{t(1)}$	[-]	Přetvoření krajního vlákna
$\varepsilon_{t(1)\max}$	[-]	Max. přetvoření krajního vlákna
$\varepsilon_{r(2)}$	[-]	Přetvoření ve směru tloušťky stěny
$\varepsilon_{r(2)\max}$	[-]	Max. přetvoření ve směru výšky
$\varepsilon_{a(3)}$	[-]	Přetvoření ve směru výšky
$\varepsilon_{a(3)\max}$	[-]	Max. přetvoření ve směru výšky
s	[mm]	Tloušťka stěny
s_{\min}	[mm]	Minimální tloušťka stěny
s_0	[mm]	Výchozí tloušťka stěny
b	[m]	Šířka ohýbaného pásu
σ_k	[Mpa]	Mez kluzu
E	[Mpa]	Modul pružnosti v tahu
R_s	[mm]	Střední poloměr ohybu
R_o	[mm]	Osový poloměr ohybu
R	[mm]	Vnitřní poloměr ohybu
M_{ov}	[Nm]	Vnitřní ohybový moment
\bar{D}	[Mpa]	Modul zpevnění
S_M	[-]	Statický moment
J	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu
d	[mm]	Vnitřní průměr trubky
R_{zb}	[mm]	Zbytkový poloměr ohybu trubky
R_c	[mm]	Poloměr při zatížení
R_{od}	[mm]	Poměr ohybu po odpružení
α	[°]	Úhel ohybu
α_{zb}	[°]	Zbytkový úhel ohybu
K_o	[%]	Koeficient ovality
D_{\min}	[mm]	Min. průměr zdeformované trubky
D_{\max}	[mm]	Max. průměr zdeformované trubky
h	[mm]	Výška čtvercového profilu
Δs	[mm]	Změna tloušťky stěny
F	[N]	Síla
a	[m]	Rameno působení síly
F_{tr}	[N]	Třecí síla
μ	[-]	Součinitel tření
F_p	[N]	Přítlačná síla
y	[mm]	Vzdálenost od osy nulové def.
K	[Mpa]	Konstanta materiálu
n	[-]	Exponent zpevnění
M_o	[Nm]	Kroutící moment matrice

R_{p02}	[Mpa]	Smluvní mez kluzu
R_m	[Mpa]	Mez pevnosti
A	[%]	Tažnost
v	[mm]	Výška vlny
t	[mm]	Rozteč zvlnění
C_{po}	[Kč]	Náklady na pořízení ohýbačky
C_{pn}	[Kč]	Náklady na nástroje
C_p	[Kč]	Celkové investiční náklady
N_m	[Kč]	Náklady na materiál
N_H	[Ks]	Výrobní kapacita ohýbačky
N_o	[Kč]	Provozní náklady ohýbačky
N_z	[Kč]	Mzdové náklady
N_K	[Kč]	Náklady na kus
N	[Ks]	Množství návratnosti
C_{pr}	[Kč]	Prodejní cena
Z	[Kč]	Ziskovost

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Materiálový list oceli UNI EN ISO E190
Příloha 2	Materiálový list oceli UNI EN ISO E220
Příloha 3	Materiálový list oceli UNI EN ISO E235
Příloha 4	Výkres závěsu pátých dveří pro škodu Superb II
Příloha 5	Dodávaný polotovar (trubka čtvercového profilu)
Příloha 6	Měření deformace průřezu
Příloha 7	Měření deformace průřezu
Příloha 8	Měření deformace průřezu
Příloha 9	Měření deformace průřezu
Příloha 10	Měření deformace průřezu
Příloha 11	Měření deformace průřezu
Příloha 12	Měření deformace průřezu
Příloha 13	Měření deformace průřezu
Příloha 14	Měření deformace průřezu
Příloha 15	Měření deformace průřezu
Příloha 16	Měření deformace průřezu
Příloha 17	Měření deformace průřezu
Příloha 18	Měření deformace průřezu
Příloha 19	Měření deformace průřezu
Příloha 20	Měření deformace průřezu
Příloha 21	Měření deformace průřezu
Příloha 22	Měření deformace průřezu
Příloha 23	Měření deformace průřezu
Příloha 24	Orientace polohy měření

